الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES DE LA TECHNOLOGIE
Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique
Option : Energies solaire et éolienne

THEME

Commande par réseaux de neurone d'un système de conversion éolien alimente par des convertisseurs a cinq niveaux

Proposé et dirigé par
Dr MOUALDIA Abdelhafid
M^{er} MORSLI Abderkader

Préparé et présenté par
LACHEMOT Rachid
KLALIB Ramdane

Année universitaire 2016 /2017

DEDICACE

Je dédie ce travaille

A Mes parents.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

LACHEMOT Rachid

DEDICACE

Je dédie ce travaille

A Mes parents.

A toute ma famille.

A tous mes amis.

KLALIB Ramadane

ملخص

تناقش هذه الأطروحة تحويل الطاقة في نظام طاقة الرياح استنادا علي آلة لا متزامنة ثنائية التغذية و باستعمال عاكس ذو خمس مستويات و منظم مستمد من الشبكة العصبية و كذا نظام التصفية لتحسين نوعية الطاقة في البداية قمنا بدراسة عامة حول نظام تحويل طاقة الرياح متبوع بنمذجة مختلف مكونات نظام تحويل طاقة الرياح بعدها قمنا باستعمال عاكس ذو خمس مستويات و كذا منظم مستمد من الشبكة العصبية بعدها قمنا بمعالجة مشكل تلوث الشبكة الكهربائية و لحل هذا المشكل قمنا بإدراج مقارنة بين نوعين من الأنظمة مع وبدون نظام التصفية النشيطة المتوازي

كلمات مفتاحية : آلة لا متزامنة ثنائية التغذية , نظام التصفية النشيطة المتوازي , الشبكة العصبية , نظام تحويل طاقة الرياح

Résumé

Ce travail a pour but d'étudier un système de conversion éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation qui est alimenté par des convertisseurs à cinq niveaux bidirectionnelles en courant et qui sont commandé par des régulateurs a base de réseau de neurone. Notre travail est divisé en plusieurs partie, commençant par l'alimentation de la MADA seule avec les différentes variations de vitesse (hyper-synchrone et hypo-synchrone) , puis introduire des convertisseurs multi-niveau , suivit des méthodes de commande vectorielle avec des régulateurs classique (PI) puis avec des régulateurs basés sur les réseau de neurone, enfin introduire un filtre actif parallèle pour éliminer les harmoniques et produire une bonne énergie en terme de qualité

Mots clés : machine asynchrone a double alimentation , filtre active parallèle , réseau de neurone , système de conversion d'énergie éolien

Abstract

This work aims to study a system of wind conversion based on a doubly-fed induction machine,, powered by converters of five levels bidirectional in current and which are controlled by a neural regulators

Our work is divided into several parts, starting with the power supply to solely the DFIM, with the different variations of speed (Hyper-synchronous and hypo-synchronous), then insert of the converters multi-level, followed the methods of vector control with classic regulators (PI) then with neural regulator, to the end introduce a active filter parallel to eliminate the harmonic and produce a good energy in term of quality

Key words: double field induction machine , active power filter , neural network , wind energy conversion systems

Sommaire

Introduction générale 02

Chapitre I : Etat de l'art sur les aérogénérateurs

I.I .Introduction ……... 05

I.2. Généralité sur le vent …… 05

I .2.1. D'où vient le vent ?..... 05

I .2.2. L'énergie cinétique du vent …….. 05

I.2.3. Limite de betz…….. 06

I.2.4. Gisement éolien en Algérie……. 08

I.3. Généralité sur l'énergie éolienne …… 08

I.3.1. Développement de l'énergie éolienne …… 08

I.3.2. Conception des éoliennes……... 09

I.3.2.1. L'éolien a axe vertical …… 09

I.3.2.2. L'éolien a axe horizontale …….. 10

a- la structure en amont …… 10

b- la structure en avale ……... 10

I.3.2.3. Les différent composant d'une éolienne ……. 11

I.3.2.4. Eolienne a vitesse fixe……. 13

I.3.2.5. Eolienne a vitesse variable ……. 14

I.3.3. Régulation de vitesse des éoliennes …… 14

I.3.3.1. Régulation a calage variable (Pitch control) ……. 15

I.3.3.2. Régulation par décrochage aérodynamique (Stall)…… 15

I.3.4. Optimisation de l'énergie éolienne ……. 15

I.3.5. Parc éolien……... 16

I.3.5.1. Parc éolien terrestre (on shore)…….…… 16

I.3.5.2. Parc éolien marin (off shore) …… 17

I.4. Systèmes de conversion de l'énergie éolienne ……... 18

I.4.1. Machine asynchrone a double alimentation …… 18

I.4.1.1. le stator …… 18

I.4.1.2 . Le rotor …… 18

I.4.1.3. Mode de fonctionnement ……. 18

a) Fonctionnement en moteur hypo-synchrone …… 19

b) Fonctionnement moteur hyper-synchrone …… 19

c) Fonctionnement génératrice hypo-synchrone ……. 20
d) Fonctionnement génératrice hyper-synchrone ……. 20
I.5. Stockage de l'énergie ……. 20
I.5.1. Stockage a court terme …….. 20
I.5.2. Stockage a long terme …… 20
I.6. Conclusion …… 21
Chapitre II : Alimentation du système de conversion
II.1 Introduction …… 23
II.2 Modélisation de la machine asynchrone a double alimentation ……. 23
II.2.1 Transformation de PARK …… 25
II.2.1.1 Application de la transformé de Park dans un repère (abc) … 26
II.3 Modélisation de la turbine ……. 28
II.3.1 Modèle de multiplicatrice de vitesse …….. 29
II.3.2 Modèle de l'arbre mécanique …….. 29
II.3.3 Caractéristique de la turbine …… 30
II.4 Alimentation de la MADA…….. 30
II.4.1 Configuration de la MADA…….. 30
II.4.2 Simulation et résultats ……. 31
II.4.3 Conclusion des testes …….. 40
II.5 Alimentation des convertisseurs Multiniveaux……. 41
II.5.1 Onduleur Multiniveaux…… 41
II.5.1.1 Structure générale ……. 41
II.5.1.2 Commande complimentaire …… 41
II.5.1.3 Commande MLI (triangulo-sinusoïdal) …… 42
a) Ordre de commutation des interrupteurs …….. 43
II.5.1.4 Simulation et résultats …….. 44
II.5.2 Redresseur Multiniveaux ……. 48
II.5.2.1 Le but de redresseur…….. 48
II.5.2.2 Principe de fonctionnement ……. 48
II.5.2.3 Commande par hystérésis ……. 49
II.6 Conclusion…….. 51
Chapitre III : Commande vectorielle
III.1.Introduction …….. 53

III.2.Modèle de contrôle indépendant des puissances …….. 53
III.3.Commande vectorielle …….. 56
III.3.1.Commande directe ……. 56
III.3.2.Commande indirecte …….. 56
III.3.3.Dimensionnement du régulateur (correcteur)……. 58
III.4.Simulation et résultats …….. 58
III.4.1.Simulation de la commande indirecte …… 58
III.5.Régulation par réseau de neurone ……. 60
III.5.1.Introduction …… 60
III.5.2.Neurone…….. 60
III.5.3.Réseau de neurones…… 61
III.5.4 Perceptron multicouche ……. 61
III.6.Commande par réseau de neurone …… 62
III.6.1.Simulation ……. 62
III.6.2.Résultats de simulation ……. 63
III.7.Conclusion…… 64
Chapitre IV : Filtre active parallèle
IV.1 Introduction …….. 66
IV.2 Filtre actif parallèle …… 66
IV.2.1 Structure de filtre actif parallèle …… 67
IV.2.1.1 Partie puissance ……. 67
IV.2.1.2 Partie contrôle commande ……. 68
IV.2.2 Méthode d'identification des courants harmonique …….. 68
IV.2.2.1 Méthode des puissances instantanées …… 68
IV.3 Modélisation de Filtre active parallèle ……. 71
IV.3.1 Charge non linéaire …… 71
IV.3.2 L'élément de stockage ……... 71
IV.3.3 Filtre de sortie …… 71
IV.3.4 Dimensionnement de régulateur PI…… 72
IV.4 Simulation et Résultats ……. 72
IV.4.1 Résultat de Simulation sans Filtre ……. 73
IV.4.2 Simulation et résultat Avec un FAP …….. 75
IV.4.2.1 Pour un Onduleur a deux niveaux …….. 75

a) Avec source de tension……. 75
b) Avec un bus continue……... 76
IV.4.2.2 Pour un Onduleur 5 niveaux …… 78
a) Avec source de tension …….. 78
b) Avec un bus continue ……. 80
IV.5 Filtrage de Système de conversion éolien raccordé au réseau ……. 82
IV.5.1 Résultats de simulation…….. 83
IV.6 Système de conversion éolien avec filtrage ……. 84
IV.6.1 Résultats de simulation ……. 85
IV.7 Conclusion……. 87

Liste de figures

Chapitre I

Figure (I.1) : montre schéma de la loi de betz 06

Figure (I.2) : montre la courbe $C_p=f(V_2/V_1)$ 07

Figure (I.3) : montre Carte de gisement éolien en Algérie (Source CDER) 08

Figure (I.4) : montre les total des installations éoliennes dans le monde jusqu'à 2016 09

Figure (I.5) : éolienne a axe vertical 10

Figure (I.6) : structures des éoliennes a axe horizontale 11

Figure (I.7) : montre les principaux composants d'une éolienne a axe horizontal 11

Figure (I.8) : montre les différents composants d'une nacelle 12

Figure (I.9): montre schéma d'une éolienne a vitesse fixe 13

Figure (I.10): montre schéma d'une éolienne a vitesse variable 14

Figure (I.11) : montre la régulation de la puissance en fonction de la vitesse de vent 14

Figure (I.12) : montre la courbe de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de vent 15

Figure (I.13) : montre une image d'un parc éolien onshore 17

Figure (I.14) : montre a gauche parc éolien offshore et ces fondation a droite 17

Figure (I.15) : montre le stator et le rotor d'une MADA 18

Figure (I.16) : montre les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA 19

Chapitre II

Figure (II.1) : orientation des axes (abc) rotorique et statorique 23

Figure (II.2) : Modèle de la turbine 28

Figure (II.3) : caractéristique de la turbine, (a) : puissance de la turbine en fonction de temps, (b) : vitesse de rotation de la turbine en fonction de temps 30

Figure (II.4) : résultat de simulation en mode hypo-synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 31

figure (II.5) : résultat de simulation en mode hypo-synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 32

figure (II.6) : résultat de simulation en mode hypo-synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 33

Figure (II.7) : résultat de simulation en mode hyper synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 34
Figure (II.8) : résultat de simulation en mode hyper synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 35
Figure (II.9) : résultat de simulation en mode hyper synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 36
Figure (II.10) : courbe qui montre la variation de la vitesse en fonction de temps 37
Figure (II.11) : Résultat de simulation pour ω variable (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 38
Figure (II.12) : Résultat de simulation pour ω variable : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 39
Figure (II.13) : résultat de simulation pour ω variable : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique 40
Figure (II.14) : montre structure d'un onduleur 5 niveau a diode flottante 41
Figure (II.15) : montre la disposition des porteuse par rapport a la référence d'une commande MLI 42
Figure (II.16) : le principe de la commande MLI 43
Figure (II.17) : Commande MLI d'un seul bras d'un onduleur 5 niveaux Sous MATLAB 43
Figure (II.18) : montre résultat de la simulation dont, (a) : signal de la tension simple V_a , (b) : spectre des harmonies de la tension V_a, (c) : spectre des harmonies de courant I_a 44
Figure (II.19) : montre résultat de la simulation dont (a): signal de la tension simple V_a , (b): spectre des harmonies de la tension V_a ,(c) ; spectre des harmonies de courant I_a. 45
Figure (II.20) : montre résultat de la simulation dont (a): signal de la tension simple V_a , (b): spectre des harmonies de la tension V_a ,(c) ; spectre des harmonies de courant I_a 46
Figure (II.21) : montre résultat de la simulation dont (a): signal de la tension simple V_a , (b): spectre des harmonies de la tension V_a ,(c) ; spectre des harmonies de courant I_a 47
Figure (II.22) : les deux modes de fonctionnement d'un redresseur Multiniveaux 49
Figure (II.17) : principe de contrôle par hystérésis 50
Figure (II.18) montre la structure générale de la commande d'un redresseur par hystérésis. 50

Chapitre III

Figure (III.1) : schéma de block de commande de la MADA 55
Figure (III.2) : montre schéma de la commande directe 56
Figure (III.3) : Schéma de la commande vectorielle indirecte 57
Figure (III.4) : schéma de la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance 57
Figure (III.5) : schéma de système de régulateur PI 58
Figure (III.6) : résultat de simulation de la commande indirecte avec, (a) : puissance active statorique, (b) : puissance réactive statorique, (c) : courant fictif directe, (d) : courant fictif en quadrature 59
Figure (III.7) : résultat de simulation de la commande indirecte avec, (a) : puissance active statorique, (b) : puissance réactive statorique, (c) : courant fictif directe, (d) : courant fictif en quadrature 59
Figure (III.8) : un neurone formel 60
Figure (III.9) : structure d'un réseau de neurone 61
Figure (III.10) : extraction des vecteurs d'entrée et de sortie d'un régulateur PI 62
Figure (III.11) : résultat de simulation par réseau de neurone dont, (a) : Puissance active (b) : puissance réactive, (c) : courant fictif en quadrature irq, (d) : courant fictif directe ird 63

Chapitre IV

Figure (IV.1) structure générale de FAP 67
Figure (IV.2) : schéma générale de l'algorithme p-q 70
Figure (IV.3) : montre le courant de la charge polluante en fonction de temps 73
Figure (IV.4) le courant d'une phase la source triphasé en fonction de temps 74
Figure (IV.5) : courant et tension d'une phase de la source triphasée en fonction de temps 74
Figure (IV.6) : le THD d'une phase de la source triphasé sans filtre 74
Figure (IV.7) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ 75
Figure (IV.8) : courbe du courant de source d'une seule phase pour le régulateur neurone 75
Figure (IV.9) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme PQ 75
Figure (IV.10) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone 75
Figure (IV.11) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ 76
Figure (IV.12) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec le régulateur neurone 76
Figure (IV.13) : Le THD avec l'algorithme PQ 76

Figure (IV.14) : Le THD avec le régulateur neurone 76
Figure (IV.15) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ 77
Figure (IV.16) : courbe du courant de source d'une seule phase avec le régulateur neurone 77
Figure (IV.17) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme PQ 77
Figure (IV.18) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone 77
Figure (IV.19) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ 77
Figure (IV.20) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec Le régulateur neurone 77
Figure (IV.21) : Le THD avec l'algorithme PQ 78
Figure (IV.22) : Le THD avec le régulateur neurone 78
Figure (IV.23) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ 78
Figure (IV.24) : courbe du courant de source d'une seule phase avec le régulateur neurone 78
Figure (IV.25) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme 79
Figure (IV.26) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone 79
Figure (IV.27) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ 79
Figure (IV.28) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec le régulateur neurone 79
Figure (IV.29) : Le THD avec l'algorithme PQ 79
Figure (IV.30) : Le THD avec le régulateur neurone 79
Figure (IV.31) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ 80
Figure (IV.32) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ 80
Figure (IV.33) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme PQ 80
Figure (IV.34) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone 80
Figure (IV.35) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ 80
Figure (IV.36) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec le régulateur neurone 80

Figure (IV.37) : Le THD avec l'algorithme PQ 81
Figure (IV.38) : Le THD avec le régulateur neurone 81
Figure (IV.39) : courbe de la tension au borne de condensateur et la tension de référence en fonction de temps avec l'algorithme PQ 81
Figure (IV.40) : courbe de la tension au borne de condensateur et la tension de référence en fonction de temps avec le régulateur neurone 81
Figure (IV.41) : courant et tension de source avent et après le filtrage 82
Figure (IV.42) : Système de conversion éolien sans filtrage connecté au réseau 83
Figure (IV.43) : courbe de puissance active et réactive statorique en fonction de temps 83
Figure (IV.44) : Courbe de courant de source d'une seule phase sans filtrage 84
Figure (IV.45) : Le THD d'une seule phase de courant de source dans filtrage 84
Figure (IV.46) : structure de système de conversion éolien avec FAP 85
Figure (IV.47) : courbe de courant de source avec FAP 85
Figure (IV.48) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps avec un FAP 86
Figure (IV.49) : Taux de THD du courant de source avec FAP 87

Liste des tableaux

Tableau (II.1) : états des interrupteurs pour chaque configuration……..……33
Tableau (IV.1) : les paramètres de système de FAP ……61
Tableau (IV, 2) : Résultats des Simulations …….…...69
Tableau (A.1) caractéristiques de la MADA ……..89

Nomenclature

Cp	coefficient de puissance
λ	ration de vitesse
P_S	puissance active statorique
P_r	puissance active rotorique
Q_s	puissance réactive statorique
Q_r	puissance réactive rotorique
g	glissement(%)
C_{aero}	couple aérodynamique
P_v	puissance de vent.
S	l'aire de balayage
ρ	Densité de l'aire.
Ω_t	vitesse angulaire.
F(HZ)	fréquence de réseau.
V_V	Vitesse de vent.
β	l'angle d'orientation de la pale.
R	Rayon de la turbine.
Ωg	vitesse angulaire de la génératrice
G	Gain du multiplicateur.
J	Inertie total .
J_g	inertie de la génératrice.
J_t	inertie de la turbine.
C_{mec}	couple mécanique.
P_n	puissance nominale
C_{em}	couple électromagnétique.
R_S	résistance statorique
R_r	résistance rotorique.
L_s	L'inductance statorique
L_r	L'inductance rotorique
L_m	l'inductance mutuelle
V_{sd} v_{sq} ;v_{rd} ;v_{rq}	tension statorique ;et rotorique sur des axes D et Q.
i_{sd} ; i_{sq},i_{sd},i_{sq},	courant statorique ;et rotorique sur des axes D et Q

ϕ_{sd}, ϕ_{sq} , ϕ_{rd} , ϕ_{rq}	flux statorique ;et rotorique sur des axes D et Q.
K_p , k_i	Gain de régulateur intégrateur, et proportionnel
Vdc	tension de bus continu
C	Valeur de condensateur
m	L'indice de modulation
R f ; l f	Resistance et l'inductance du filtre RL
L_{fa}	L'inductance de filtre de sortie
$i_{ref\ a}$ $i_{ref\ b}$ $i_{ref\ c}$	Les courants de référence dans l'axe triphasé
$I_{ref\alpha}$ $i_{ref\beta}$	Les courants de référence dans l'axe biphasé
Ica icb icc	Les courants de charges
V_{sa} V_{sb} V_{sc}	Tension simple au point de raccordement
V_α V_β	Tension simple dans le repère biphasé
I_{ha} I_{hb} I_{hc}	Les Courants harmoniques
THD	Taux distorsion harmonique
Ls	Inductance série
Rs	Resistance série
Vdc ref	Tension de référence de bus continue
F0	Fréquence de coupure
ξ	Dépacement

Abréviations

MADA	Machine asynchrone a doublet alimentation.
AC	courant alternative
DC	courant continu.
PI	Régulateur proportionnel et intégrateur
CCM	Convertisseur cote machine
CCR	Convertisseur cote réseau
MLI	modulation a largeur d'impulsion
MPPT	Maximum power point tracking.
FAP	Filtre actif parallèle.

Introduction générale

Introduction générale

La consommation de l'énergie sous toutes ces formes ne cesse de croitre de nos jours , cette croissance a des effets sur les réserves d'énergie non renouvelables aussi sur le réchauffement climatique , la hausse de la température de globe est devenue un enjeux mondiale pour cela plusieurs réunion international auront lieu chaque année pour prendre des décisions strictes pour maintenir la hausse moyenne des températures mondiale inferieure a 2°C et cela on contribuant a la diminution de gaz a effet de serre

A ce propos plusieurs intention pour basculer vers une énergie verte non polluante comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne , cette dernière a connu récemment d'importante investissement un peut partout dans le monde , l'année 2015 est considérer comme l'année record pour l'énergie éolienne selon GWEC avec environ 63 GW installé dans le monde , ces installations sont sous formes des fermes (parcs) soit offshore ou onshore qui forme des centrales électriques , on s'intéresse dans notre travail sur le système de conversion éolien basé sur une machine asynchrone a double alimentation alimenter par des convertisseur a cinq niveau et qui sont commandé par des régulateurs a base de réseau de neurone

Le premier chapitre est consacrer sur l'état de l'art de l'énergie éolienne on va entamer d'une manière générale les notions théoriques sur le vent et les différents types et technologies de l'énergie éolienne mise en œuvre , ainsi les différents éléments qui contribuent a la chaine de conversion éolien qui repose essentiellement sue la machine asynchrone a double alimentation (MADA) ou on a expliquer sont mode de fonctionnement et son avantage de fonctionner dans les quatre quadrants

Dans le deuxième chapitre on va alimenter la MADA et lui subir différentes teste de vitesse en hyper-synchrone et hypo-synchrone et voir sont comportement et les différents caractéristiques qui influe sur elle , dans une second approche on va introduire un onduleur a cinq niveau a structure diode flottante au niveau de rotor de la MADA , command » par la technique MLI on va changer a chaque fois l'indice de modulation (m) pour chaque porteuse et on distingue les modification apporter a la MADA notamment sur le taux de THD , puis en fin de chapitre on va boucler notre système par un convertisseur coté réseau modéliser par un redresseur commandé par hystérésis

Le troisième chapitre est consacré sur la commande vectorielle de la MADA , pour résoudre le problème de couplage entre le courant et le flux et rendre le comportement de la MADA similaire a celui de la machine a courant continue a excitation indépendante , pour cela on va introduire des méthode de commande vectorielle comme la commande directe et indirecte et voir son intérêt sur le comportement de la MADA , puis on va remplacer les régulateurs classiques (PI) utiliser dans la commande vectorielle par des régulateurs a base de réseau de neurone

Dans le chapitre quatre on va étudier et modéliser un filtre active parallèle avec les différentes configuration , avec un onduleur a deux niveau puis avec un onduleur a cinq niveau utiliser dans le deuxième chapitre , on remplaçant a chaque fois la source de tension de l'onduleur par un bus continue modéliser par un condensateur et dans chaque cas on va identifier les courants perturbateur par un algorithme PQ et le remplacer dans un second teste par un régulateur base sur les réseau de neurone , en fin on va introduire le filtre active parallèle dans notre système de conversion éolien et voir les performance qu'il apporte sur la qualité de l'énergie produite

Chapitre (I)

Etat de l’art sur les aérogénérateurs

I .Introduction

Depuis l'antiquité l'être humain n'a cessé d(utiliser le vent comme énergie dans plusieurs domaine soit pour les moulin a vent , ou bien pour faire marcher les navires , avec l'évolution l'être humaine comprend qu'on peut extraire de l'électricité depuis l'énergie cinétique de vent donc plusieurs technologie ont été mise en œuvre

De nos jours l'énergie éolienne est parmi les leader dans le domaine de production d'électricité de source renouvelable grâce au forte puissance qu'elle produit qui atteint des méga watts

Dans ce chapitre on va entamer les différentes technologies mise en œuvre ainsi leur caractéristiques et mode de fonctionnement

I.2. Généralité sur le vent

I.2.1. D'où vient le vent ?

l'énergie du vent (ou énergie éolienne) est dérivée du soleil , chaque jour le soleil émis environs $1.74x10^{17}$ W , 1 a 2 % de cette énergie est converti en énergie éolienne (vent) , lorsque le soleil réchauffe l'air des région ayant un fort rayonnement solaire (région de la ceinture solaire) , l'air chauffé s'élève a des haute altitude (environ 10 km) puis il s'étend vers le nord et vers le sud il sera remplacer par l'air froid a des haute altitude l'air chaud sera refroidi a son tour ce déplacement d'air génère du vent , autrement dit le vent c'est un déplacement de l'air des zone de haute pression a des zone de basse pressions , pratiquement tout type de vent est le résultat d'une différence de pression , mais la cause des variation de la pression peuvent être diverses

I.2.2. L'énergie cinétique du vent

l'énergie cinétique contenue dans un objet en déplacement est proportionnelle a sa masse volumique (poids) , l'énergie cinétique du vent dépend donc de la masse d'air (masse par unité de volume) , autrement dit plus l'air est dense plus l'énergie récupérable est importante
Donc l'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air d'une masse (m) donnée par

$$E = \frac{1}{2} m.V^2 \qquad \text{(I.1)}$$

Sachant que :
la puissance présente dans le vent dans une durée Δt s'exprime

$$P_{vent} = \frac{E}{\Delta t} \qquad \text{(I.2)}$$

Et la masse d'air (m) qui passe a travers une surface S durant un temps Δt est donnée par

$$\frac{m}{\Delta t} = S.\rho.V \quad (I.3)$$

d'où

$$P = \frac{1}{2}S.\rho.V^3 \quad (I.4)$$

ou :

P: puissance de vent (ou puissance captée)

S : la surface balayée

ρ : la masse volumique de l'air

V : la vitesse de vent

I.2.3. Limite de betz

la puissance disponible dans le vent (puissance capte ou puissance de vent) n'est pas exploitable totalement par les aérogénérateurs, il est nécessaire donc de les optimiser a fin qu'ils puissent extraire le maximum d'énergie a partir du vent disponible

le physicien allemand Albert betz affirme qu'il existe une certaine limite que les aérogénérateurs ne peuvent pas dépasser appeler "la limite de betz" ou "loi de betz"

Démonstration :

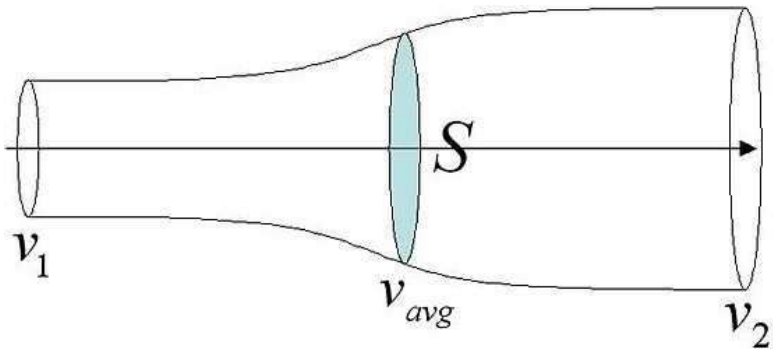


Figure (I.1) : montre schéma de la loi de betz

on sait que la masse d'air traversant une surface S pendant un certain temps égale a

$$\frac{m}{\Delta t} = S.\rho.V \quad (I.5)$$

son énergie cinétique vaut

$$E = \frac{1}{2}m.V^2 \quad (I.6)$$

on note V_1 la vitesse de vent entrant (en amont) et V_2 la vitesse de vent sortant (en avale) de l'aérogénérateur, donc l'énergie cinétique a l'entrée (E_1) et a la sortie (E_2) peuvent s'écrire comme suit

$$E_1 = \frac{1}{2} m.{V_1}^2 \text{ et } E_2 = \frac{1}{2} m.{V_2}^2 \quad \text{(I.7)}$$

L'énergie perdu qui est transformer en énergie mécanique dans l'aérogénérateur est donnée par

$$E_m = E_1 - E_2 \text{ d'où } E_m = \frac{1}{2} m.(V_1^2 - V_2^2) \quad \text{(I.8)}$$

on suppose que la vitesse de vent qui traverse la surface balayé (V_{avg}) est la moyenne de V_1 et V_2 , $V_{avg}=(V_1+V_2)/2$, donc la masse d'air a cette instant doit être [6]

$$m = \boldsymbol{\rho . S . \frac{V_1 + V_2}{2}} \quad \text{(I.9)}$$

L'énergie transformer est

$$E_m = \frac{1}{4} \boldsymbol{\rho . S . (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)} \quad \text{(I.10)}$$

Pour comparer l'énergie transformer a celle disponible (en amont) on s'intéresse donc au rapport (E_m/E_1) qui est le coefficient de puissance Cp [6]

$$C_p = \frac{E_m}{E_1} = \frac{[\frac{1}{4}.\rho.S(V_1+V_2)(V_1^2-V_2^2)]}{\frac{1}{2}.\rho.S.V_1^3} \quad \text{(I.11)}$$

âpres le développement de l'équation on trouve

$$C_p = \frac{E_m}{E_1} = \frac{1}{2}.\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right) + \left(1 + \frac{V_2}{V_1}\right) \quad \text{(I.12)}$$

On trace ensuite le graphe $C_p = f(V_2/V_1)$ sur la figure suivante

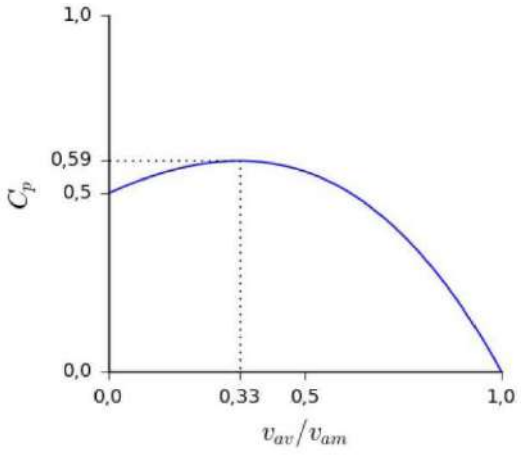


Figure (I.2) : montre la courbe $C_p=f(V_2/V_1)$

On remarque que le maximum de la courbe est atteint en 0.592 soit 59.2% , ce qu'il veut dire que l'énergie captée par le rotor ne peut pas dépasser 59.2 % de l'énergie disponible dans le vent ce qu'on appelle la limite de betz

$$P_{capté} = 0.592 x P_{disponible} \quad \text{(I.13)}$$

I.2.4. Gisement éolien en Algérie

l'Algérie prévoit d'ici 2030 prés de 40 % de la production national de l'électricité des sources renouvelable, l'énergie éolien est en deuxième place âpres l'énergie solaire , pour cela une étude de gisement éolien est nécessaire pour une connaissance de la métrologie de vent
la plus récente carte de gisement éolien en 2013 réaliser par Dr BOUDIA mesuré a 10 m du sol elle inclue de nouveau point de mesure [4]

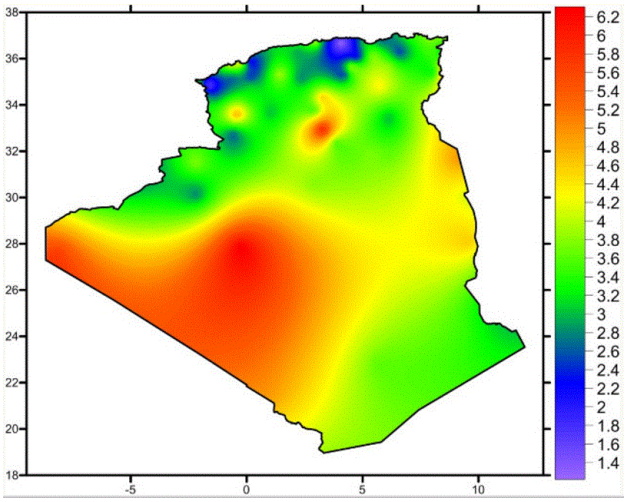


Figure (I.3) : montre Carte de gisement éolien en Algérie (Source CDER [4]

cela permet d'avoir une idée sur les site ventées ou ont peut exploiter l'énergie éolienne , cette carte montre que les régions du sud ont un potentiel (en vitesse de vent) plus important que les régions de nord surtout les sites qui se situe a ADRAR qui dépasse 6 m/s

I.3. Généralité sur l'énergie éolienne

I.3.1. Développement de l'énergie éolienne

l'énergie éolienne est en croissance dans le monde , cela est le résultat directe des politique d'énergie renouvelable mises en place par les gouvernement pour atteindre l'objectif de maintenir la hausse moyenne des température mondiales sous 2 degrés Celsius , ces politique doivent être soutenue par un financement adéquat
GWEC (Global Wind Energy Concil) affirme que 2015 est l'année record pour l'énergie éolienne avec plus de 63000 MW installer dans le monde , ce chiffre a subit une diminution en 2016 a 54000 MW installé , la chine est en tète de classement en 2016 avec 42 % des installation suivi des états unis et l'Allemagne avec 15 % et 10 % , pour que la production mondiale de source éolienne s'élève a 487 GW fin 2016 [3]

Pour 2017 la chine prévoit d'améliorer son parc offshore et surpasser le Danemark pour la 3eme place mondiale des parcs offshores après L'Angleterre et l'Allemagne

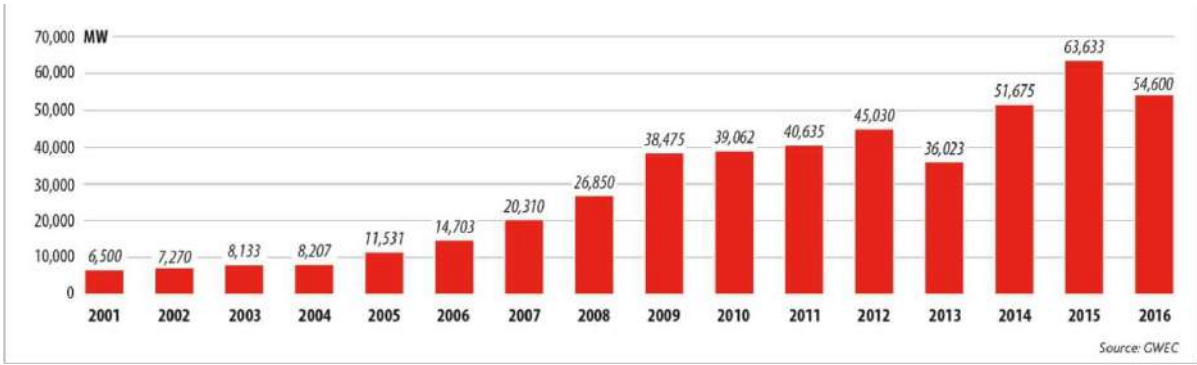


Figure (I.4) : montre le total des installations éoliennes dans le monde jusqu'à 2016 [3]

I.3.2. Conception des éoliennes

Le rôle de l'éolienne c'est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique passant par l'énergie mécanique de rotation, plusieurs élément et composant entre en considération pour réaliser une tel conversion

les éolienne en générale sont définis par l'orientation de leur axe de rotation par rapport a la direction de vent

I.3.2.1. L'éolien a axe vertical

nommé aussi VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) tourne sur une tige vertical d'où son nom elle sont moins mise en œuvre car elle sont moins performant que ceux a axe horizontale , ce type d'éolienne ne nécessite pas de dispositif d'orientation , un autre avantage est de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau de sol ce qui facilite les intervention de maintenance , mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des faible vitesse de vent proche du sol [1]

par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatique , il faut la lancer dés l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production

le développement de ces éolienne est limité grâce a leur faible capacité de conversion d'énergie, le seul model industrialisé est celui invente par l'ingénieur français George DARRIEUS connu sous (éolienne de Darrieus) [1]

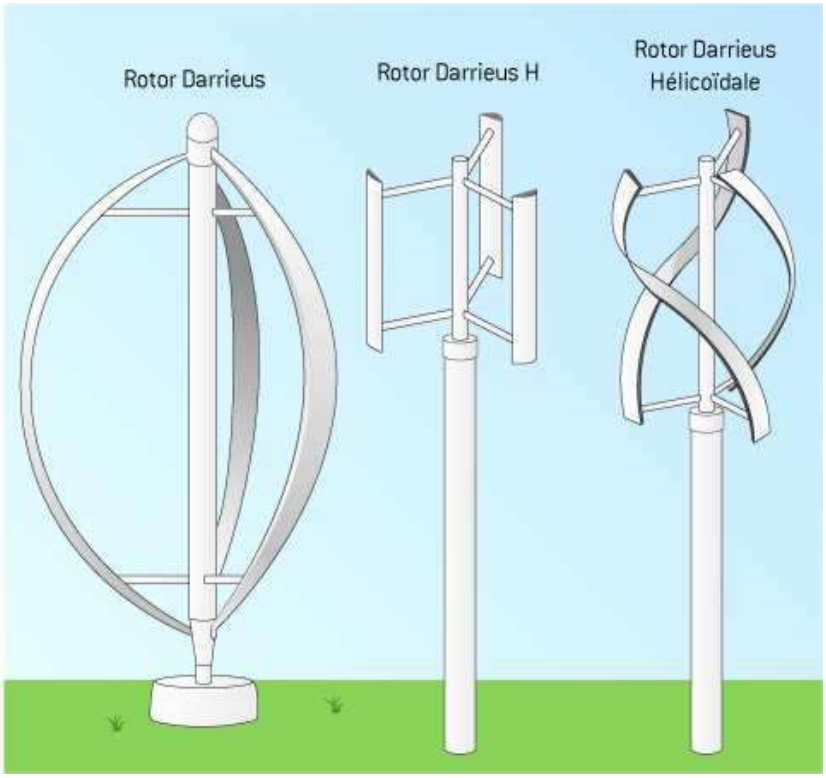


Figure (I.5) : éolienne a axe vertical

I.3.2.2. L'éolien a axe horizontale

nommé aussi HAWT (Horizontal axis Wind Turbine) , base sur le principe des moulin a vent apparue en Egypte antique et en perse , l'éolienne a axe horizontale est la plus répondue que celle a axe vertical grâce a son rendement supérieure puisque elle fonctionne sous des vitesse élevée de vent (en hauteur et loin du sol) a cette hauteur le vent est nettement plus fort car il est moins ralenti par les relief [1]

les éolienne a axe horizontale constituent généralement on nombre de pale compris entre 1 a 3 pales, les systèmes a tripales sont les utiliser grâce a leur cout , leur vitesse de rotation , leur coefficient de puissance ainsi l'aspect esthétique par rapport aux bipale et mono-pale

Les éolienne a axe horizontale a leur tour peuvent être utiliser en deux catégories ou structures:

a) **la structure en amont :** ce type de structure exige des pales rigides qui peuvent supporter des forte vitesse de vents car ils sont plus exposer au vent , les grand éolienne ayant des forte puissance fonctionne avec ce principe [2]
b) **la structure en avale :** dans ce type de structure le vent souffle sur l'arrière des pales. cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles [2]

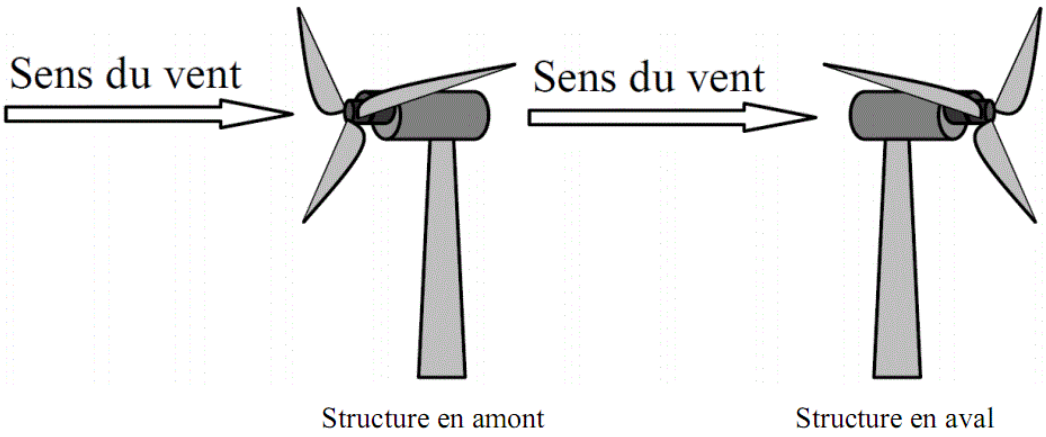


Figure (I.6) : structures des éolienne a axe horizontale

I.3.2.3. Les différents composants d'une éolienne

Le mat (tour ou pylône)

il est de structures différentes selon le dimensionnement il supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne, on trouve les tour ou mat cylindrique en acier ou en béton conçu pour les grandes éolienne sa forme conique le rend rigide tout en minimisant le poids on trouve également les tours en treillis métallique et les tour haubané, mais ils génère des perturbation aérodynamique ainsi une emprise au sol peut être gênante [2]

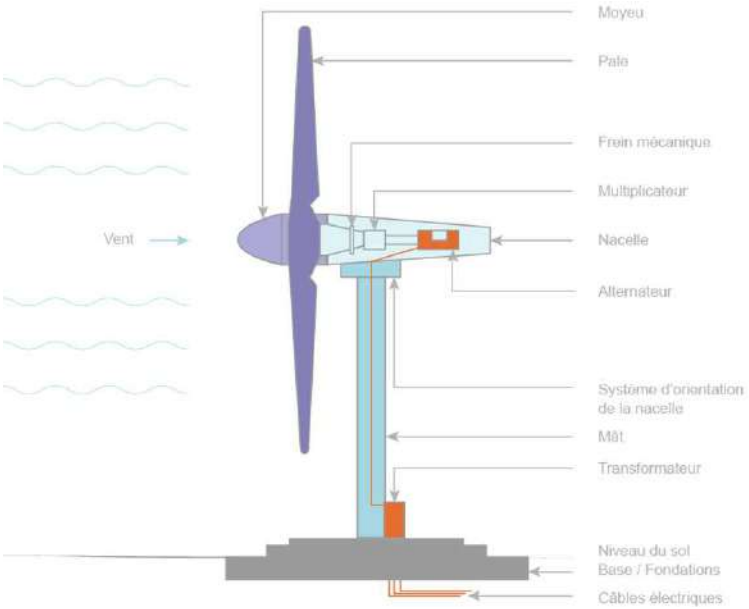


Figure (I.7) : montre les principaux composant d'une éoliennes a axe horizontal

Le rotor :

c'est la partie rotative de l'éolienne qui est responsable de capter l'énergie cinétique de vent fort et régulier, il est constituer d'un ensemble de pales (généralement trois) et de l'arbre primaire l'ensemble est mis en rotation par l'énergie cinétique du vent , la liaison entres ces éléments est assurer pas le moyeu

La nacelle :

la nacelle est pendu en haut de la tour (mat) elle regroupe les élément mécanique qui permet de relier le rotor au génératrice elle comporte a l'intérieure les composant nécessaire a la conversion de l'énergie mécanique de l'arbre primaire en énergie électrique

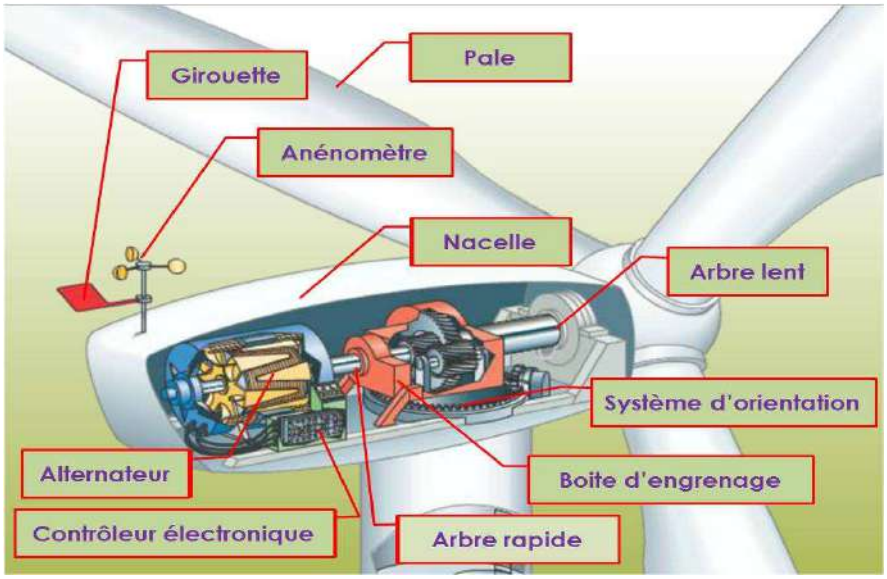


Figure (I.8) : montre les différents composants d'une nacelle

Anémomètre/girouette :

est un dispositif de mesure de la vitesse de vent ainsi sa direction , un tel dispositif doit être installer a un emplacement libre de tout obstacle environnant afin de ne pas fausser les lectures des vents et de leurs directions (Anémomètre pour mesurer la vitesse de vent , girouette pour la direction du vent)

Systèmes d'orientation :

c'est un mécanisme qui permet d'orienter la nacelle et les pales face au vent, les dispositifs de mesures (Anémomètre / girouette) transmet en temps réel des données a un microprocesseur qui actionne le système d'orientation (généralement un moteur électrique ou hydraulique situer prés de l'axe verticale) , c'est ce moteur qui pivote la nacelle et les pales lorsque le vent change de direction

Arbre primaire (Arbre lent) :

il transmet le mouvement des pales (rotor) il est dit lent puisque sa vitesse de rotation est compris entre (20-40 tr/min) tandis que son couple mécanique est élevé

Arbre secondaire (arbre rapide) :

il entraine la génératrice a des vitesse élevé (environ 2000 tr/min) il est équiper d'un frein a disque mécanique qui permet de limiter la fréquence de rotation en cas de vent violent

Multiplicateur (Boite d'engrenage) :

relie l'arbre primaire (lent) a l'arbre secondaire (rapide) , il permet de transformer la puissance a vitesse élève et a couple faible captée par les pales en une puissance a vitesse élever et a couple faible pour actionner une génératrice

Contrôleur électronique :

est un ordinateur qui gère l'ensemble du système en utilisant les donnée récupérer depuis les différents dispositifs de mesures , puis grâce a des programme et algorithme sophistiquer actionne l'arrêt ou le démarrage de la machine

Alternateur ou génératrice :

elle peut être synchrone ou asynchrone elle transforme l'énergie mécanique de rotation de l'arbre secondaire en une énergie électrique , la rotation du rotor (de la génératrice) induit un champ électromagnétique qui génère un courant dans le stator

I.3.2.4. Eolienne a vitesse fixe

ce type d'éolienne sont les premier a avoir été développer grâce a la simplicité de mise en ouvre, ou la génératrice est directement coupler au réseau électrique donc la vitesse Ωmec est imposer par deux paramètres (la fréquence de réseau et le nombre de paire de pole de la génératrices) qui sont fixes

Pour produire de l'énergie électrique dans ce cas il faut que la génératrice tourne a une vitesse supérieure de la vitesse de synchronisme (impose par la fréquence de réseau) , donc pour s'adapter a cette vitesse il faut un multiplicateur de vitesse (généralement un système mécanique a engrenage) [12]

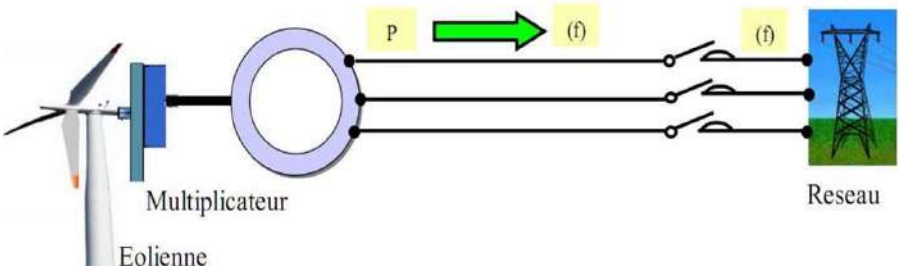


Figure (I.9): montre schéma d'une éolienne a vitesse fixe

I.3.2.5. Eolienne a vitesse variable

ce type d'éolienne présente une nouvelle ère pour l'énergie éolienne , plusieurs étude et recherche affirment l'intérêt de la vitesse variable grâce aux développement de l'électronique de puissance a rendu ces systèmes plus fiable sur le plan énergétique et a moindre cout [12]

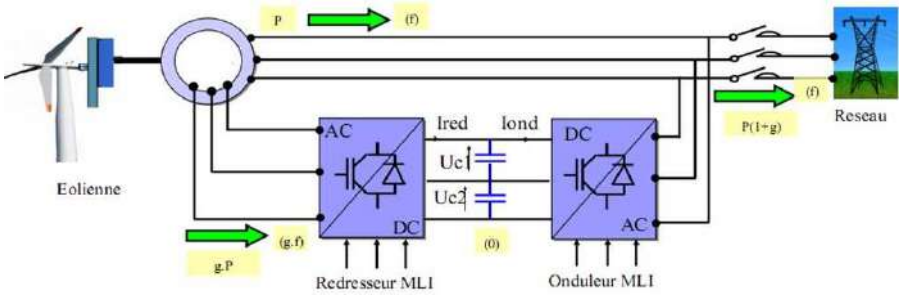


figure (I.10): montre schéma d'une éolienne a vitesse variable

les convertisseur d'électronique de puissance offrent un meilleur contrôle de la qualité d'énergie produit en particulier la puissance active et réactive injecté sur le réseau a fin d'améliorer le facteur de puissance

I.3.3. Régulation de vitesse des éoliennes

la vitesse de vent est de nature stochastique, il est rares d'avoir des vitesse constant et régulière, pour cela les aérogénérateur doivent s'adapter aux changement de la vitesse de vent pour extraire le maximum de l'énergie cinétique disponible

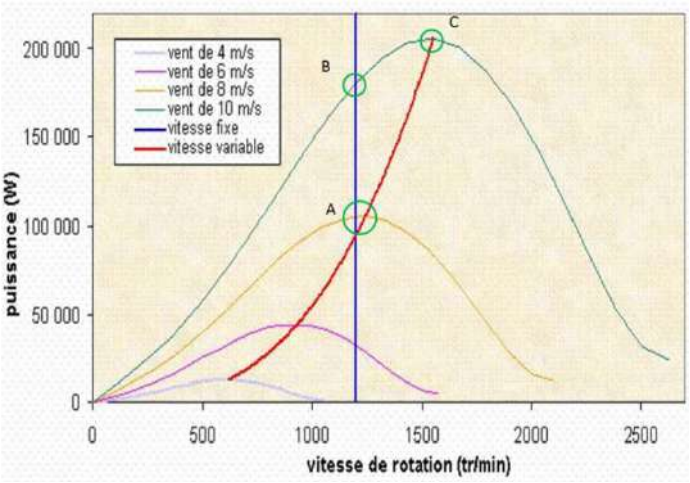


Figure (I.11) : montre la régulation de la puissance en fonction de la vitesse de vent

pour une vitesse de vent V_1 et une vitesse mécanique Ω_1 on obtient une puissance P_1 (point A) , si la vitesse de vent passe de v_1 a v_2 et que la vitesse mécanique de la génératrice reste constante on obtient une puissance P_2 (point B) , mais la puissance optimale se trouve ailleurs dans la même courbe de caractéristique (point C) , donc pour extraire la puissance maximale (du point C) on doit varier la vitesse de la génératrice

Pour s'adapter a la vitesse variable de vent on dispose de différents Systems de régulation

I.3.3.1. Régulation a calage variable (Pitch control)

nommé aussi éolienne a pas variable, dans ce type d'éolienne un système de contrôle est mis en disposition qui mesure la puissance de sortie de l'éolienne (du aux vitesse de vent)

Systèmes de conversions de l'énergie éolienne, le contrôleur traite ces mesures grâce a des algorithmes et envoie une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pales hors de vents fort et inversement lorsqu'il s'agit de faible puissance de vents [12]

I.3.3.2. Régulation par décrochage aérodynamique (Stall)

nommé aussi éolienne a pas fixe dans ce type d'éolienne les pales sont fixé au moyeu d'une façon rigide la géométrie des pales est conçue de façon a mètre en profit en cas de vitesse de vent trop élevé , le décrochage aérodynamique provoquant des turbulences sur la partie qui n'est pas face au vents ce qui empêche la portance d'agir sur le rotor [12]

I.3.4. Optimisation de l'énergie éolienne

Tenant compte de caractère fluctuant de vent , aussi la résistance limité de la structure , l'objectif d'optimiser l'énergie est d'une part de protéger la détérioration de la turbine grâce a des vents violent , d'une autre part et de fonctionner proche de la puissance maximal admissible (optimal) de l'énergie incidente

La courbe qui caractérise la puissance mécanique en fonction de la vitesse de vent est décomposée en quatre zones

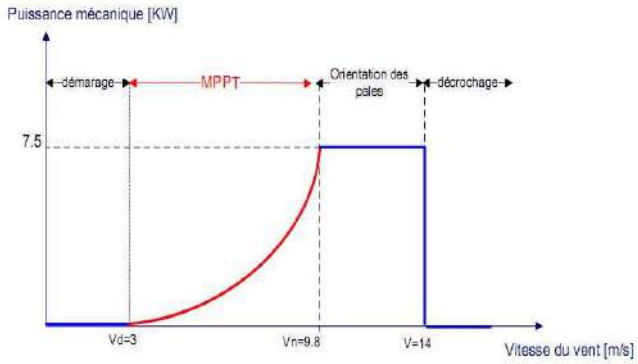


Figure (I.12) : montre la courbe de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de vent

La courbe de puissance est une caractéristique importante de l'éolienne , elle représente la distribution de puissance instantanée pour chaque vitesse de vent mesuré a la hauteur de moyeu

zone 1 : correspond a la zone de démarrage de la machine ou la vitesse de vent est très faible , insuffisante pour le démarrage de la turbine , dans ce cas elle ne fonctionne pas donc pas de production de l'énergie

Zone 2 : dans ce cas la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse de vent , donc c'est dans cette zone qu'il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation par l'intermédiaire de système de contrôle , la puissance récupérer est alors variable

Zone 3 : ici la vitesse de rotation est maintenue constante dont la puissance extraite est donc limitée , tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine , la puissance fournie donc reste égale a la puissance nominale

Zone 4 : lorsque la vitesse de vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne , dans ce cas la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence afin de protéger la partie mécanique de l'éolienne et éviter les dégâts

le système de contrôle intervient tout au long de fonctionnement de la turbine par la variation de l'angle de calage β d'une manière prépondérante depuis le démarrage (zone 1) et dans le régime de régulation de vitesse (zone 2 et 3) jusqu'au phénomène de décrochage aérodynamique (zone 4) [12]

I.3.5. Parc éolien

I.3.5.1. Parc éolien terrestre (on shore)

un parc éolien ou ferme éolienne est un site qui regroupent plusieurs éolienne a fin de produire une grande puissance électrique destiné a la vente ou a la consommation local , ils se trouvent dans des zones ou le vent est fort et régulier les éolienne sont distance entre elle, généralement ces parc se situe a proximité des postes de transformation haute tension pour diminuer le cout de raccordement



Figure (I.13) :montre une image d'un parc éolien on-shore

I.3.5.2. Parc éolien marin (off shore)

une éolienne offshore c'est-à-dire installé en mer d'où son nom , le terme anglais (offshore) veut dire "hors-cotes" par opposition au éolienne terrestre (on shore) les deux fonctionnent selon le même principe qui est de convertir l'énergie cinétique de vent en électricité , la différence principale entre un model marin et terrestre repose essentiellement sur la nature des fondation

la construction d'une éolienne offshore doit être robuste a fin de résister aux condition marines difficiles généralement éloigner environ 10 km des cotes et peuvent dépasser les 40 mètres de profondeurs raccorder au réseau terrestre par un câble sous-marin , la nacelle et la tour sont équiper d'un système de contrôle pour éviter tout risque de corrosion interne



Figure (I.14) : montre a gauche parc éolien offshore et ces fondation a droite

I.4. Systèmes de conversion de l'énergie éolienne

I.4.1. Machine asynchrone a double alimentation

la MADA est une machine a courant alternative qui repose essentiellement sur la notion de champ tournant

elle est constituer de deux principales armature , un armature fixe qui est le stator , et l'autre mobile (rotatif) autour d'un axe, le rotor

I.4.1.1. le stator

est un ensemble de bobinage déposé a 120° les uns des autres , ces besoin sont alimenter par un systèmes triphasé (déphasé de 120 ° soit 2π/3) le courant qui passe dans ces bobines va crée une champs magnétique dans chacune et comme elles sont déphasés , le champs magnétique crée a son tour est déphase de 120 ° ce qu'on appelle le champs tournant , la vitesse de ce champs dépend de la fréquence de la source d'alimentation et ainsi de nombre des paire de pole Ns=60f/p (tour/min)

I.4.1.2 . Le rotor

est constituer des bobines logés dans des encoches qui possède le même nombre de paire de pole que le stator formant des enroulement , ces dernier sont également alimenter par un système de tension triphasé grâce a un collecteur (bagues et balais) , l'ensemble tourne a une vitesse de rotation Ωr (rad/s) Nr (Tour/min) et a une fréquence fr

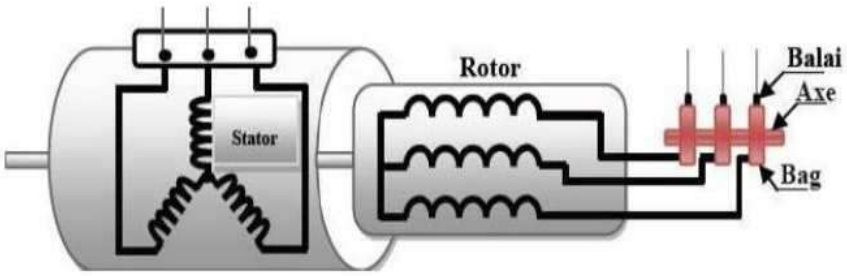


Figure (I.15) : montre le stator et le rotor d'une MADA

I.4.1.3. Mode de fonctionnement

Le système triphasé qui alimente le stator va crée un champ magnétique tournant a la vitesse Ωs qui dépend de la fréquence de system d'alimentation (vitesse de synchronisme) et ainsi de nombre de pair de pole qui le constitue d'où Ωs=ω/p

le flux magnétique crée va générer des tension induite dans le rotor

si on entraine le rotor a une vitesse supérieure a la vitesse de synchronisme ,donc la vitesse de rotation de champs rotorique sera en avance par rapport a la vitesse de champs statorique

(synchronisme) , dans ce cas le champs tournant vu par le rotor change du sens par rapport au cas moteur puisque Ωr>Ωs donc le glissement sera négative, dans ce cas la puissance mécanique Pmec=Tem.Ωr devient alors supérieur a la puissance électromagnétique Pelm=Tem.Ωs , c'est donc le mode génératrice ce principe est le même pour les machine asynchrone classique

la différence entre les machine asynchrone classique et la MADA réside dans le fait que la MADA ce n'est pas la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement en moteur ou génératrice , mais c'est la commande des tensions rotorique qui permet de gérer le champs magnétique a l'intérieure de la machine offrent la possibilité de fonctionner en hyper-synchrone ou hypo-synchrone , ainsi de contrôler le facteur de puissance , donc la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quartes quadrants comme il est indiquer sur la figure suivante

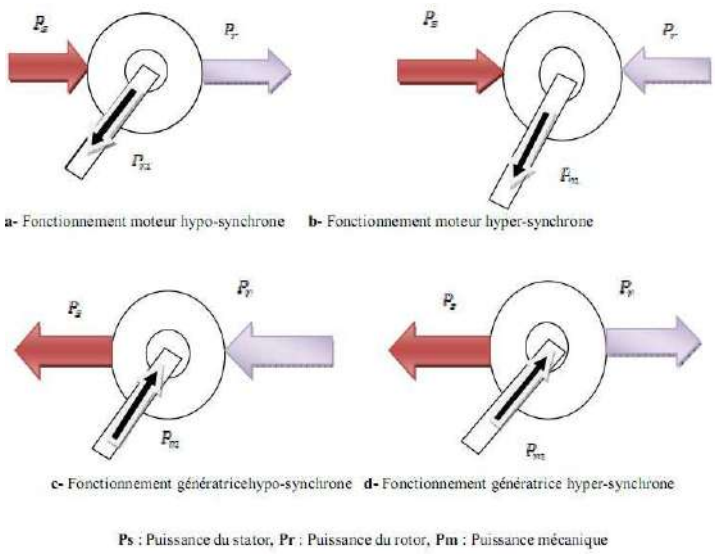


Figure (I.16) : montre les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA

a) Fonctionnement en moteur hypo-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement la vitesse de la turbine est faible en dessous de la vitesse de synchronisme, la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement et renvoyer au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs

b) Fonctionnement moteur hyper-synchrone

Dans ce mode la vitesse de la machine varie au-delà la vitesse de synchronisme dans ce cas une partie de la puissance fournie par le réseau est transmise au rotor par les convertisseurs sera converti en puissance mécanique

c) Fonctionnement génératrice hypo-synchrone

Dans ce cas la machine est entrainer par une turbine , une partie de la puissance transiter par le stator est réabsorber par le rotor

d) Fonctionnement génératrice hyper-synchrone

Dans ce mode de fonctionnement la totalité de la puissance mécanique fournie par la turbine a la machine est transmise au réseau par le stator une partie est transmise via le rotor

I.5. Stockage de l'énergie

on s'intéresse aux modes de stockages qui peuvent être utiliser dans les systèmes de production de l'énergie éolienne , le but est double , stocker de l'énergie électrique dans des périodes ou la vitesse de vent est forte pour l'utiliser ultérieurement dans les périodes de faible vitesse de vent , et aussi pour laisser le maximum des puissance produite par les aérogénérateurs [1]

le stockage se fait souvent sous une être forme (chimique , mécanique ..) , il nécessite alors des conversion énergétique , on distingue deux différents mode de stockage

I.5.1. Stockage a court terme

a court terme le Transfer d'énergie se fait rapidement , de quelque second a quelque minutes , on trouve généralement dans ce mode de stockage des système d'inertie (volant d'inertie) mais le développement récent des supercondensateurs permet d'avoir des solution de stockage électrochimique plus performant

ce mode de stockage nécessite des système a grand cycle (charge/décharge) grâce a la rapidité de Transfer d'énergie donc les deux systèmes cité (volant d'inertie , et supercondensateurs) offrent une meilleur solution que les systèmes de stockages classique basé sur les batterie

l'intérêt de stockage a court terme c'est de lisser les fluctuation de puissance de par leur dynamique plus rapide a celle des batterie classique , par compensation des pics survenue en cas de défauts [1]

I.5.2. Stockage a long terme

pour les systèmes de stockage a long terme, les plus répondue sont ceux basé sur les batterie électrochimique, de nos jours on voit le développement des systèmes complexes comme les systèmes a air comprimer, ou encore l'électrolyse associer a une pile a combustible

Les batteries ont évoluer durant cette dernière décennie et offrent désormais des capacités volumique et massique très importante notamment avec les dernière génération du

type lithium polymère elle permettent aussi des fonctionnement en cyclage sans grande contrainte avec des chargeurs optimisant leur duré de vie

l'intérêt de stockage a long terme c'est d'assurer l'alimentation de la charge pendant les jours a faible production , exemple , lorsque la vitesse de vent est faible pour faire tourner la turbine , ainsi produire de l'électricité , donc le système de stockage doit etre dimensionner d'une façon a satisfaire la charge pendant ces périodes [1]

I.6.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons décrit d'une manière générale les systèmes d'énergie éolienne voir leurs principe de fonctionnement et les différents types et technologies mise en ouvre dans ce domaine , ainsi les différents composant qui participe dans la chine de conversion , en particulier les éoliennes a axe horizontale qui sont les plus utiliser de nos jours grâce a leur caractéristiques et performance expliquer précédemment qui repose essentiellement sur la machine asynchrone a double alimentation (MADA) qui offrent une large gamme d'application grâce a la possibilité de fonctionnement dans les quatre quadrant et aussi sa contribution a réduire le dimensionnement des systèmes de conversion d'électronique de puissance

Chapitre II

Alimentation du système de conversion

II.1 Introduction

La production de l'énergie éolienne nécessite une chaine de conversion bien définie , qui comporte divers éléments d'électrotechnique ainsi de l'électronique de puissance a fin de réaliser un système de conversion performant , base sur la MADA (Machine Asynchrone a Double Alimentation) qui possède un stator analogue a celui des machines asynchrone classiques et un rotor bobiné accessible par un système bague-balais (collecteur)

Dans ce chapitre on s'intéresse a l'alimentation de ces divers éléments et voir comment ils se comportent avec les variations des grandeurs électrique tel que la tension et la fréquence ainsi des grandeur mécanique qui repose essentiellement sur la vitesse de rotation de l'arbre lie au rotor de la MADA qui transmet la vitesse de la turbine voir la vitesse de vent (en hyper-synchrone et en hypo-synchrone)

L'alimentation de ces éléments se fait par une simulation avec le logiciel MATLAB qui inclue les bibliothèques SIMULINK, SimPowerSystems ou on trouve une large gamme des éléments qui peuvent réaliser notre simulation et relever les différentes caractéristiques de la MADA tout en modifiant les grandeurs électrique et mécanique

Avant d'entamer la simulation on peut faire une modélisation de la MADA on transformant les différents grandeurs depuis un système triphasé a un système diphasé

II.2 Modélisation de la machine asynchrone a double alimentation

La machine étudier est décrite dans l'espace électrique par, trois enroulement identique disposer sur le stator est déphase par un angle électrique de $2\pi/3$, et trois enroulement rotorique équivalent déphasé aussi par un angle de $2\pi/3$ tournant a une vitesse Ω Comme il est indiqué dans la figure suivante

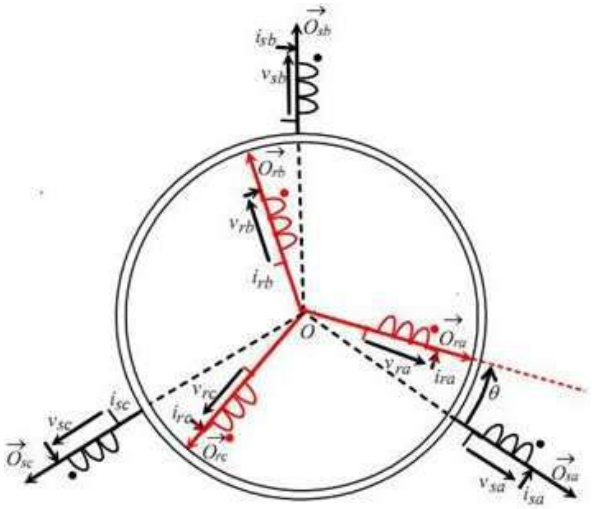


Figure (II.1) : orientation des axes (abc) rotorique et statorique

la loi de Lenz nous permet d'écrire la tension statorique comme suit

$$V_s = R_s . I_s + \frac{d\theta_s}{dt} \quad \text{(II.1)}$$

$$V_s = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, I_s = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}, \theta_s = \begin{bmatrix} \theta_{sa} \\ \theta_{sb} \\ \theta_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.2)}$$

dans le repère naturelle on a

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta_{sa} \\ \theta_{sb} \\ \theta_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.3)}$$

ps : il est de même que pour le rotor

Ce modèle est basé sur la linéarité de circuit magnétique qui se traduit par l'utilisation des inductances (propres et mutuelles)

le flux total dans chaque enroulement est la somme de

- son flux propre (lie a son propre inductance pour un flux statorique)
- des deux flux de couplage au niveau de stator (lie par les inductance mutuelle pour le flux statorique)
- les trois flux de couplage avec le rotor (lie par des mutuelle inductance variables vis-à-vis la position de rotor)

la relation de flux total pour une seul phase statorique s'écrit :

$$\phi_s = L_s I_{sa} + m_s I_{sb} + m_s l_{sc} + M_{sr} \left(I_{ra} \cos(\theta) + I_{rb} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{rc} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \right) \quad \text{(II.4)}$$

$$\left[[\emptyset_s] = \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & m_s & m_s \\ m_s & L_s & m_s \\ m_s & m_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + M_{sr}[R(\theta)] \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \right] \quad \text{(II.5)}$$

ou

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad \text{(II.6)}$$

L'inductance dans chaque enroulement se décompose en une inductance principale (ou dite propre, noté par l'indice p) qui participe au flux commun et une inductance de fuite (note avec l'indice σ) on écrit donc

L'inductance d'un enroulement statorique

$$l_s = l_{sp} + l_{s\sigma} \quad \text{(II.7)}$$

L'inductance d'un enroulement rotorique

$$l_r = l_{rp} + l_{r\sigma} \tag{II.8}$$

la MADA est alimenté par une source de tenions triphasé équilibré on a donc

$$I_{as} + I_{bs} + I_{cs} = 0 \tag{II.9}$$

pour simplifier les équations des flux on va introduire les inductance cyclique Ls et Lr dans l'équation original de flux , on pose $L_s = (l_s - m_s)$ et $L_r = (l_r - m_r)$ qui prend compte de la contribution des trois phases on aura donc

$$\varphi_{as} = (L_s + m_s)I_{as} + m_s I_{bs} + m_s I_{cs} + M_{sr}\left(I_{ra}\cos(\theta) + I_{rb}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{rc}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \tag{II.10}$$

on simplifier cette équation et on aura

$$\varphi_{as} = L_{as}I_{as} + M_{sr}\left(I_{ra}\cos(\theta) + I_{rb}\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + I_{rc}\cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \tag{II.11}$$

on peut écrire les relation générales des flux statorique et rotorique comme suit

$$\begin{bmatrix}[\varphi_s]\\ [\varphi_r]\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}[L_s] & [M_{sr}(\theta)]\\ [M_{sr}(\theta)]^T & [L_r]\end{bmatrix}\begin{bmatrix}[i_s]\\ [i_r]\end{bmatrix} \tag{II.12}$$

II.2.1 Transformation de PARK

la transformation de Park permet de simplifier les équations et les calcules on passants d'un systèmes triphasé a un system diphasé

la propriété fondamentale de la transformé de Park est de ramener les grandeur statorique et rotorique dans un même repère et définie a partir de (II.13)

$$[X_{dqo}] = [P(\psi)][X_{\alpha\beta o}] \tag{II.14}$$

et $$[X_{\alpha\beta o}] = [C][X_{abc}]$$

donc on peut résumer directe la transformer de Park directement par : (II.15)

$$[X_{dqo}] = [P(\psi)][X_{abc}]$$

Ou P[(ψ)] est la matrice de Transfer définit par (II.16)

$$[P(\psi)] = [R_p(\psi)][C]$$

[C] et [Rp(ψ)] sont des matrices orthogonales

[C] : Matrice lie a la transformé de Concordia (Matrice de Concordia)

[Rp(ψ)] : est la matrice de rotation de repère (αβo) vers le repère (dqo)

$$[P(\psi)] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos(\psi) & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\psi) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.17)}$$

II.2.1.1 Application de la transformé de Park dans un repère (abc)

Quelque soit les grandeurs rotorique ou statorique on a :

$$[V_{abc}] = [R][i_{abc}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abc}] \quad \text{(II.18)}$$

on appliquant la transformation linéaire (transformation inverse de Park) on aura

$$[P]^{-1}[V_{dqo}] = [R][P]^{-1}[i_{dqo}] + \left(\frac{d}{dt}\right)\left[[P]^{-1}[\phi_{dqo}]\right] \quad \text{(II.19)}$$

on multipliant par [P] on obtient :

$$[V_{dqo}] = [R][i_{dqo}] + \left(\frac{d}{dt}\right)[\phi_{dqo}] + [P]\left(\frac{d[P]^{-1}}{dt}\right)[\phi_{dqo}] \quad \text{(II.20)}$$

et on a : $[P]\left(\frac{d[P]^{-1}}{dt}\right)[\phi_{dqo}] = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left(\frac{d\psi}{dt}\right)$

on obtient en final le systèmes des équations de Park , qui constitue ainsi un modèle électrique dynamique pour l'enroulement diphasé équivalent

$$\begin{cases} V_d = ri_d + \left(\frac{d\theta_d}{dt}\right) - \left(\frac{d\psi}{dt}\right)\phi_q \\ V_q = ri_q + \left(\frac{d\theta_q}{dt}\right) + \left(\frac{d\psi}{dt}\right)\phi_d \\ V_0 = ri_o + \left(\frac{d\theta_o}{dt}\right) \end{cases} \quad \text{(II.20)}$$

a partir de ce modèle générale on peut obtenir les équation lie au stator ainsi ceux lie au rotor on remplaçant l'angle (ψ) par (θs) pour le stator et (θr) pour le rotor, au aura donc deux matrice de transformation noté [P(θs)] et [P(θr)]

ou - θ_s est l'angle électrique (S_a, O_d)

- θ_r est l'angle électrique (R_a , O_d)

la transformation proposé établissent les relations entres les flux d'axes (d,q,o) et les flux d'axes (a,b,c)

On a $\left[\varphi_{s_{dqo}}\right] = [P(\theta_s)]\left[\varphi_{r_{abc}}\right]$ (II.21)

et $\left[\varphi_{rdqo}\right] = [P(\theta_r)][\varphi_{rabc}]$ (II.22)

Après le développement de ces expressions on obtient

- pour le stator

$$[\varphi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][[L_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}]] \quad \text{(II.23)}$$

soit : $[\varphi_{sdqo}] = [P(\theta_s)][L_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_s)][M_{sr}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}]$ (II.24)

- pour le rotor

$$[\varphi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][[M_{rs}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}]] \quad \text{(II.25)}$$

soit : $[\varphi_{rdqo}] = [P(\theta_r)][M_{sr}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [P(\theta_r)][L_r][P(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}]$ (II.26)

Apres des simplification on aboutit a la relation matricielle suivante

$$\begin{bmatrix}\varphi_{sd}\\ \varphi_{sq}\\ \varphi_{so}\\ \varphi_{rd}\\ \varphi_{rq}\\ \varphi_{ro}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 & \frac{3M_{sr}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 & 0 & \frac{3M_{sr}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & l_s + 2m_s & 0 & 0 & 0 \\ \frac{3M_{sr}}{2} & 0 & 0 & l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3M_{sr}}{2} & 0 & 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & l_r + 2m_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}\\ i_{sq}\\ i_{so}\\ i_{rd}\\ i_{rq}\\ i_{ro}\end{bmatrix} \quad \text{(II.27)}$$

On remarque que la transformation de Park rend les coefficients de la matrice des inductances indépendants de temps

la composante homopolaire (φ_{so},i_{so}),(φ_{ro},i_{ro}) intervient pour équilibré le système transformé c'est-à-dire elle ne participe pas a la création de (fmm) de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d,q) , donc les composant d'indice (o) sont nulles

dans ces condition de fonctionnement les flux d'axes (d,q) sont simplement représenter par les trois paramètres Ls, Lr, M et sont relier aux courants par la relation

Relation des flux

$$\begin{bmatrix}\phi_{sd}\\ \phi_{dq}\\ \phi_{rd}\\ \phi_{rq}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}\\ i_{sq}\\ i_{rd}\\ i_{rq}\end{bmatrix} \quad \text{(II.28)}$$

ou Ls =ls-ms et Lr=lr-mr et M=3Msr/2

Equations des tensions

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\theta_{sd}}{dt} - \omega_s \emptyset_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\theta_{sq}}{dt} + \omega_s \emptyset_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\theta_{rd}}{dt} - \omega_r \emptyset_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\theta_{rq}}{dt} + \omega_r \emptyset_{rq} \end{cases} \quad \text{(II.29)}$$

Le couple électromagnétique

$$C_{em} = p\left(\emptyset_{sd} i_{sq} - \emptyset_{sq} i_{sd}\right) \quad \text{(II.30)}$$

La puissance et réactive

$$P_s = \left(V_{sq} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}\right) \quad \text{(II.31)}$$

$$Q_s = \left(V_{sq} i_{sd} - V_{sd} i_{sq}\right) \quad \text{(II.32)}$$

$$P_r = \left(V_{rd} i_{rd} + V_{rq} i_{rq}\right) \quad \text{(II.33)}$$

$$Q_r = \left(V_{rq} i_{rd} - V_{rd} i_{rq}\right) \quad \text{(II.34)}$$

Avec ce systèmes d'équation on peut facilement faire un model de simulation d'une MADA sous forme de bloque de simulation sur MATLAB pour former un model dynamique équivalent a celui de la bibliothèque SimPowerSystems qu'on va utiliser par la suite dans notre simulation

II.3 Modélisation de la turbine

Le modèle des turbines les plus exploité est celui de trois pales de langueur R, fixé sur un arbre tournant dit arbre lent qui tourne a la vitesse de la turbine (vitesse de vent), et qui entraine la génératrice a travers un multiplicateur [7]

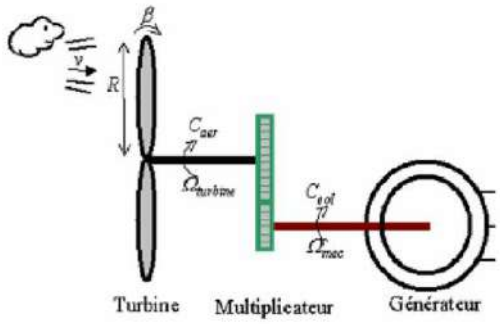


Figure (II.2) : Modèle de la turbine

La vitesse de vent est donné par la relation (I.4), et comme cette puissance n'est pas totalement extraite car il existe une certaine limite, on introduit alors un coefficient Cp appelée coefficient de puissance, qui dépend des caractéristique aérodynamique des pales

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau de rotor de la turbine s'écrit :

$$P_m = C_p P_{vent} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad \text{(II.35)}$$

La turbine a pour but de convertir l'énergie cinétique de vent en une énergie mécanique de rotation son couple est donner par :

$$C_{aero} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad \text{(II.36)}$$

La ration de vitesse est donnée par la relation suivante

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V} \quad \text{(II.37)}$$

L'expression générale de coefficient Cp en fonction de λ ,β est donner par

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_2} - C_3 - C_4 \right) \exp\left(\frac{C_5}{\lambda_1} \right) + C_6 \lambda \quad \text{(II.38)}$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad \text{(II.39)}$$

$C_1 = 0.5176 \quad C_2 = 116 \quad C_3 = 0.4 \quad C_4 = 5 \quad C_5 = 21 \quad C_6 = 0.0068$

II.3.1 Modèle de multiplicatrice de vitesse

Le multiplicateur qui relie mécaniquement la turbine a la génératrice a pour objectif d'adapter la vitesse de la turbine a la vitesse de la génératrice, il est modéliser par ces équations [7]

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega \quad \text{(II.40)}$$

$$C_g = \frac{1}{G} C_{aero} \quad \text{(II.41)}$$

II.3.2 Modèle de l'arbre mécanique

L'arbre est composer d'une masse qui correspond a l'inertie de la turbine qui porte les pales , le moyeu , et la masse du rotor de la turbine , le modèle mécanique considère l'inertie total qui correspond a l'inertie de la turbine a ramener au rotor de la génératrice et l'inertie de la génératrice [7]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_G \quad \text{(II.42)}$$

II.3.3 Caractéristique de la turbine :

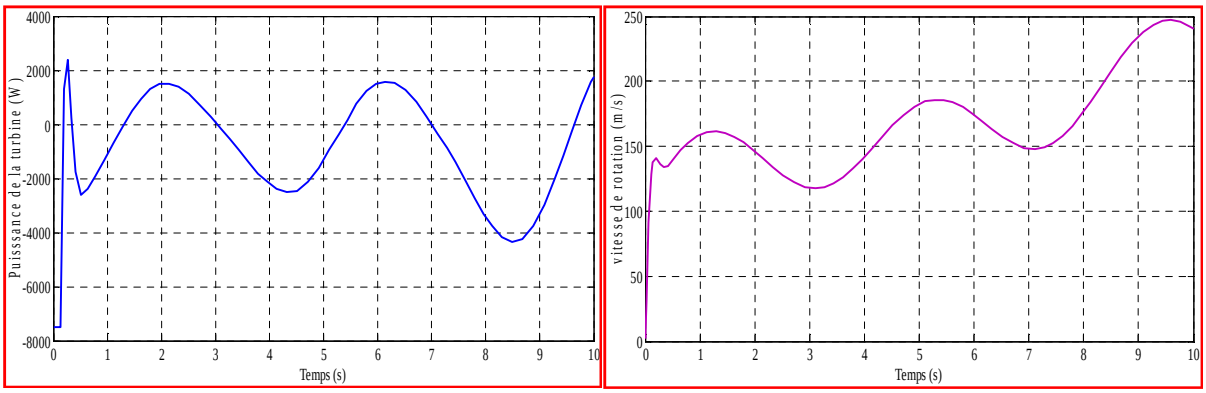


Figure (II.3) : caractéristique de la turbine, (a) : puissance de la turbine en fonction de temps, (b) : vitesse de rotation de la turbine en fonction de temps

La figure (II.3) illustre deux caractéristique importante de la turbine qui sont la vitesse de rotation qui a pour rôle d'entrainer la génératrice, et la puissance de la turbine qui peut être modélisé comme une puissance de référence de notre génératrice

II.4 Alimentation de la MADA

Comme il est indiqué précédemment la MADA peut être alimenté par deux sources de tensions différentes, d'où la nature de ces sources n'est pas préciser (soit un réseau électrique ou bien des convertisseurs adaptée), ce qui offre une large possibilité de configuration

La configuration la plus utiliser dans le système de production d'énergie éolienne a vitesse variable consiste a relier le stator a un réseau électrique, tandis que le rotor est alimenter par un convertisseur bidirectionnelles en courant, ce dernier offre un contrôle de facteur de puissance coté réseau ainsi il permet de fonctionner en mode hypo-synchrone et hyper-synchrone

II.4.1 Configuration de la MADA

La MADA qu'on va simuler se trouve dans la bibliothèque SimPowerSystems de MATLAB qui fonctionne en mode moteur ou génératrice, donc dans notre cas c'est une génératrice qui a comme caractéristiques voir ANNEXE A tableau (A.1)

II.4.2 Simulation et résultats

On alimente le stator par le réseau électrique de fréquence 50 hz et de tension efficace de 380 V, puis on varie a chaque fois l'alimentation de rotor par différentes tension et fréquence, ainsi on changeant sa vitesse de rotation en hyper-synchrone ou hypo-synchrone a fin de distinguer les différents caractéristique apporter a la MADA, les résultats sont comme suit :

- pour ω=100 rad/s , Vr = 5 v et fr =50 hz

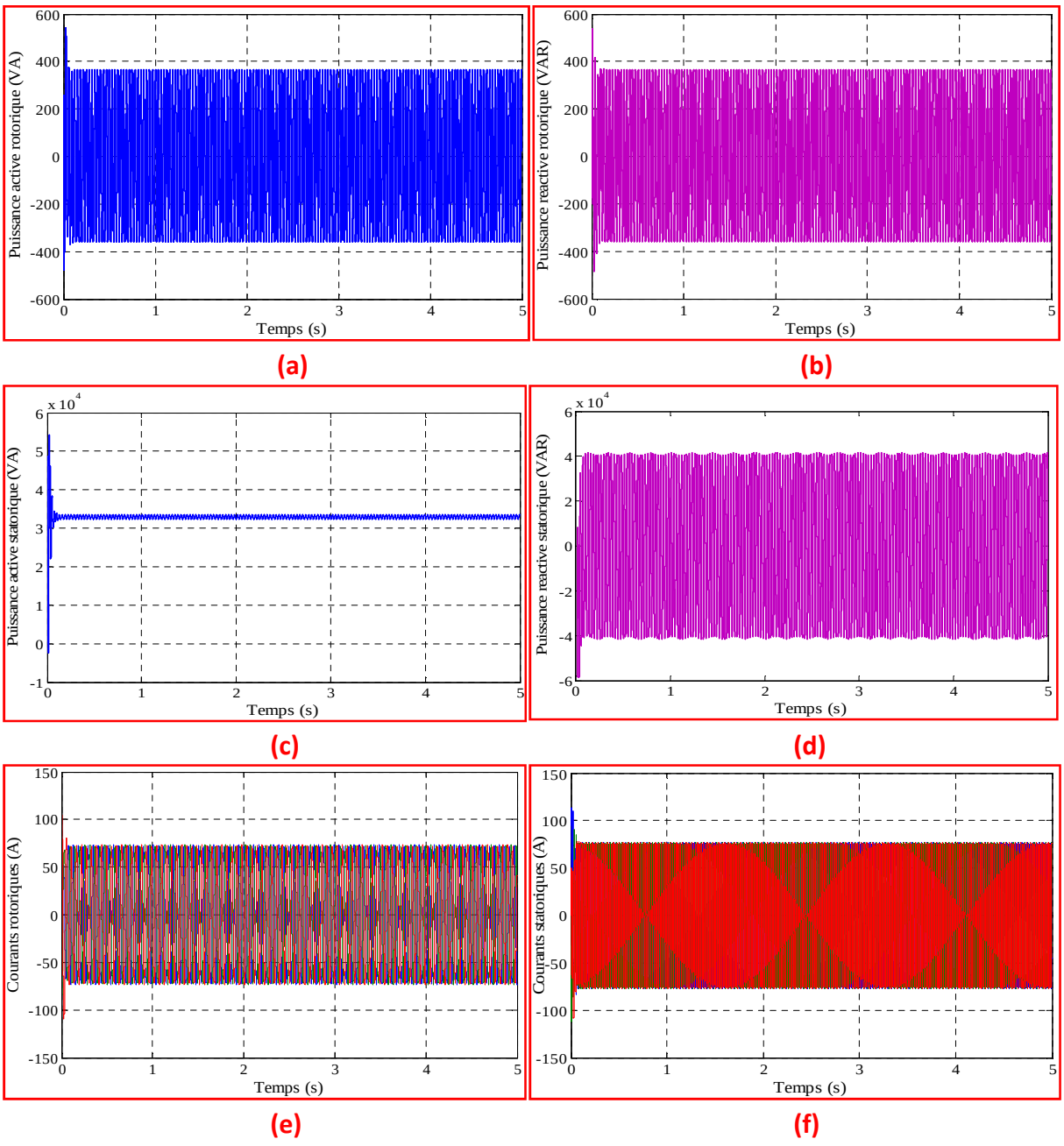


Figure (II.4) : résultat de simulation en mode hypo-synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

D'âpres les graphes de la figure (II.4) on distingue que la puissance active rotorique varie entre -359 w et 365 w il est de même pour la puissance réactive du rotor (en VAR) , coté stator on distingue une puissance active de l'ordre de (32.2-33.6) KVA et la puissance réactive varier entre (-41 et 41) KVAR , le courant rotorique varie (-72 et 72)A et le courant statorique entre (-77 et 77) A

- pour ω=100 rad/s , Vr= 5 v et fr=5 hz

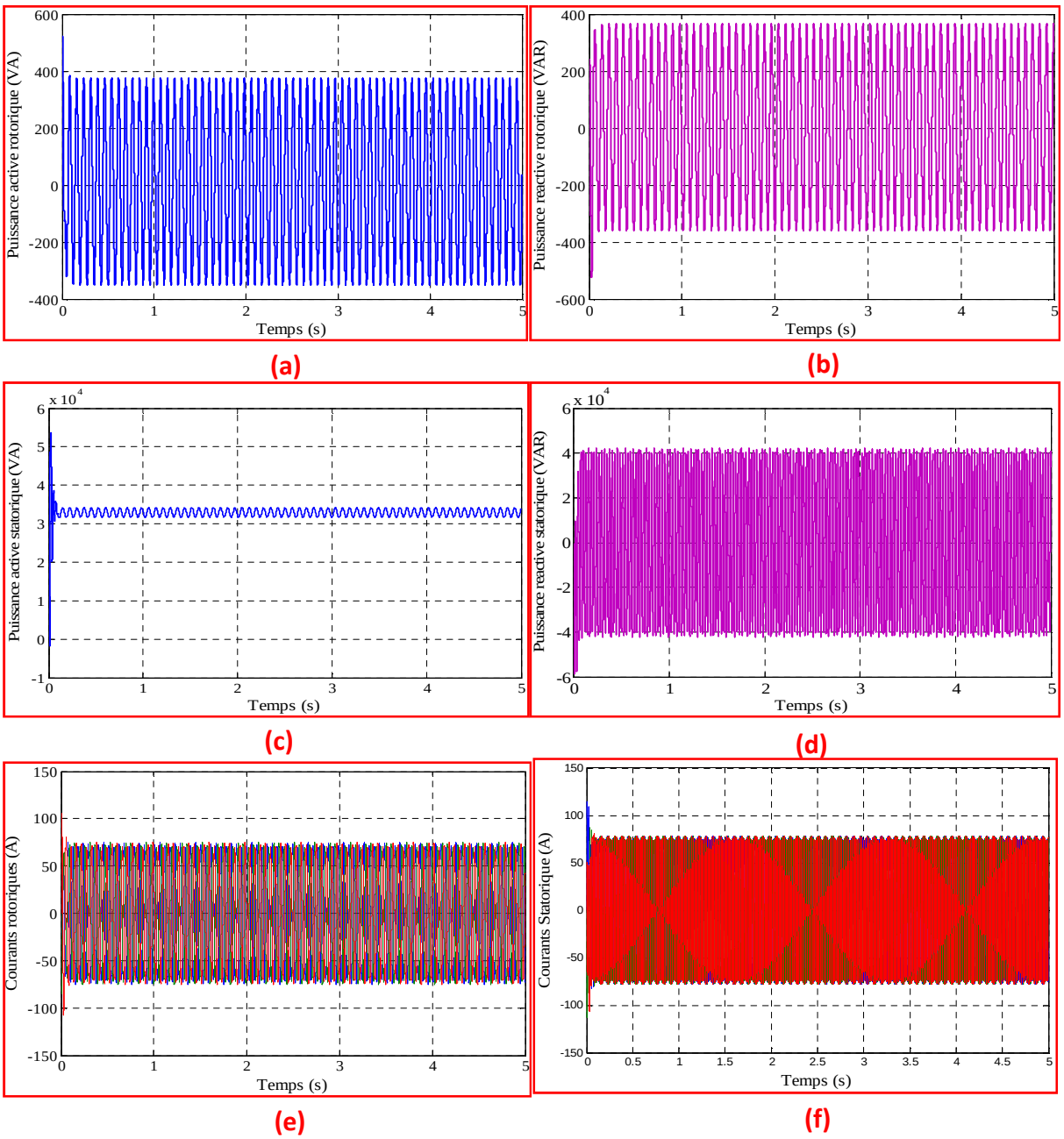


figure (II.5) : résultat de simulation en mode hypo-synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

On distingue dans la figure (II.5) que lorsqu'on change la fréquence rotorique en maintenant les autres paramètres, L'amplitude des puissances actives et réactives rotorique ou statorique restent pratiquement les mêmes, juste la fréquence des ondulations qui va changer

- pour ω=100 rad/s , Vr= 50 v et fr=5 hz

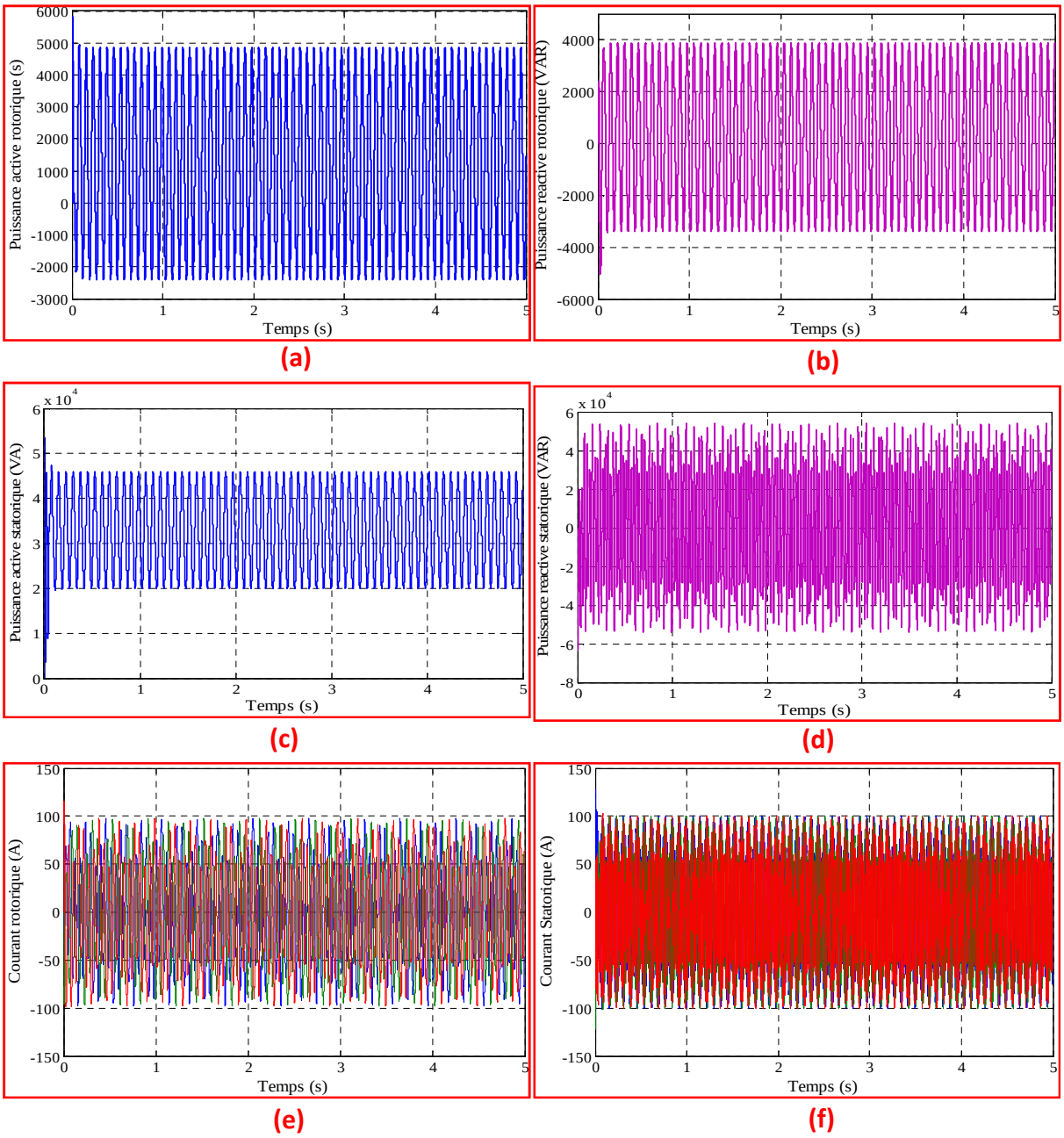


figure (II.6) : résultat de simulation en mode hypo-synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

on distingue dans la figure ci-dessus (II.6) que lorsqu'on change la tension rotorique , on remarque une variation au niveau des puissance active rotorique qui sera d'une valeur

moyenne continue , ainsi une augmentation des puissance active et réactive soit rotorique ou statorique , tandis que la fréquence des ondulation reste constante , donc la variation de tension influe principalement sur l'amplitude des puissances rotorique et statorique

On conclue que dans le mode hypo-synchrone la puissance fournie par la MADA par le stator, une partie de cette puissance est réabsorbé par le rotor

- pour ω=200 rad/s , Vr= 5 v et fr=50 hz

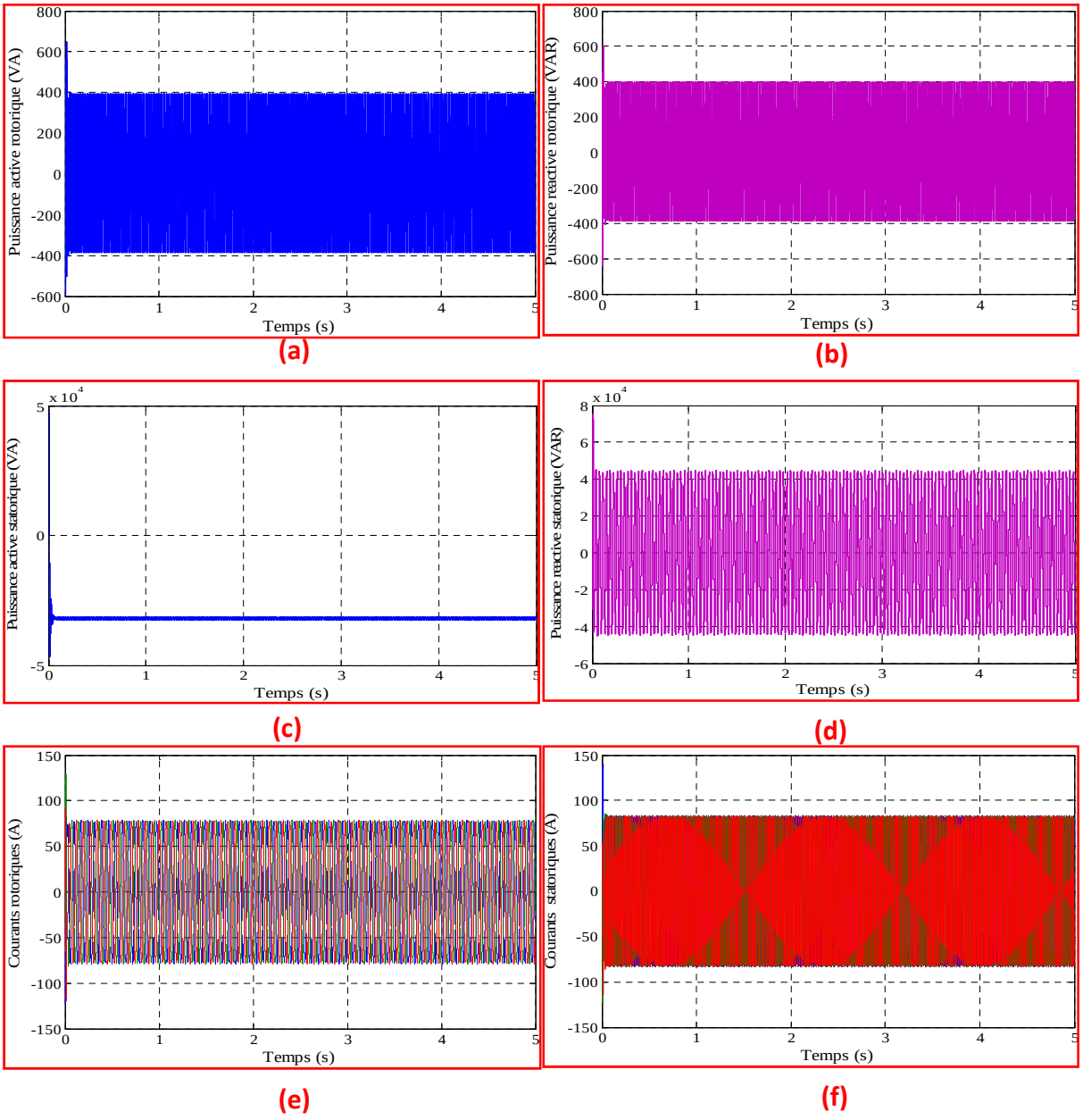


Figure (II.7) : résultat de simulation en mode hyper synchrone : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

Pour le teste hyper-synchrone on distingue que la puissance active rotorique varie au voisinage de (-400 et 400) VA de même que la puissance réactive en VAR la puissance

active statorique a une valeur continue négative de 32 KVA et la puissance réactive statorique varie entre (-43, 43) KVAR

- pour ω=200 rad/s , vr 5 v et f=5 hz

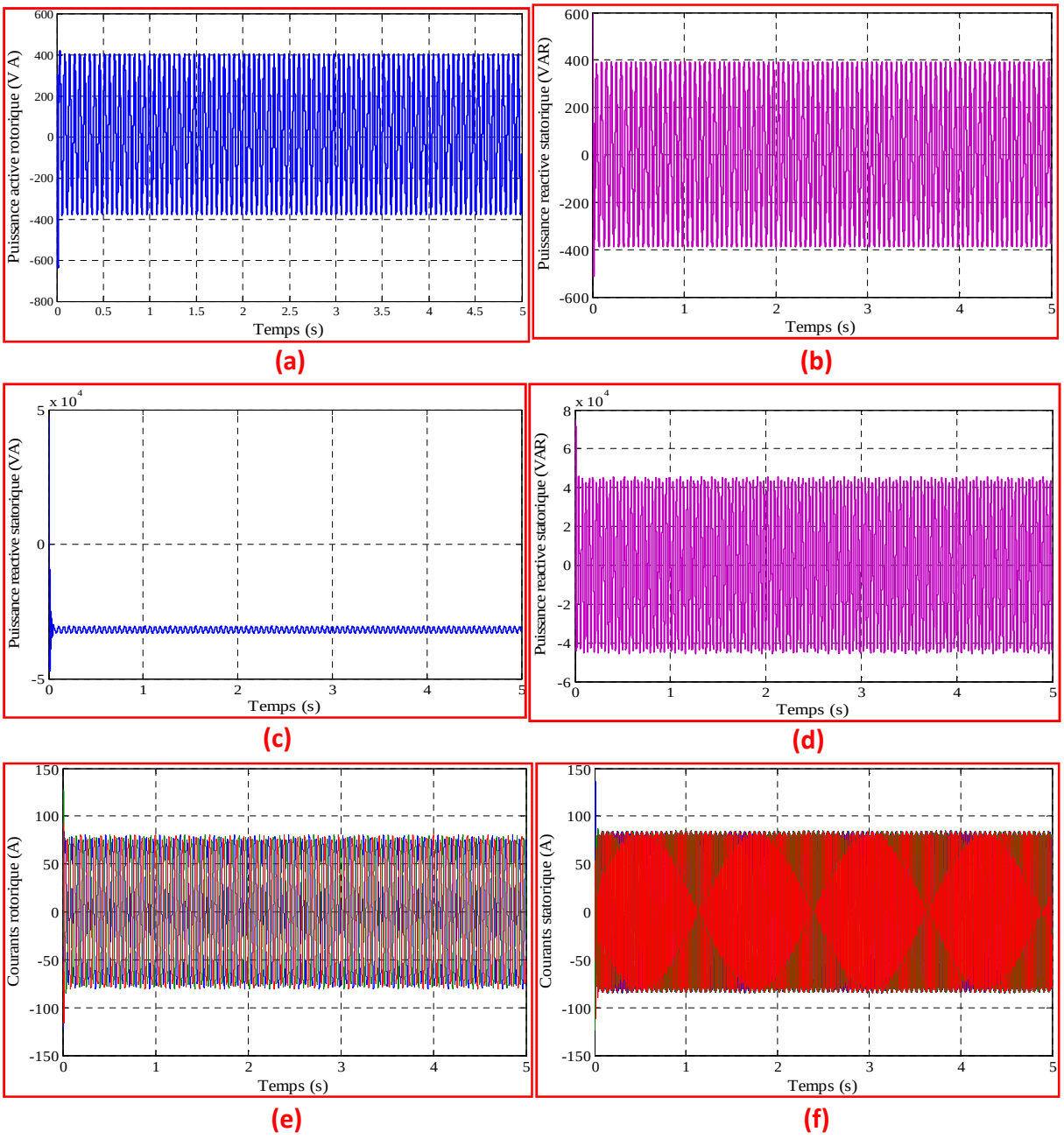


Figure (II.8) : résultat de simulation en mode hyper synchrone : (a) : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

D'âpres la figure (II.8) ci-dessus on distingue que l'amplitude des puissances actives et réactives rotorique ou statorique restent pratiquement les même que la figure précédente, ainsi la courbe des courant, juste la fréquence des ondulations change

- pour ω=200 rad/s , vr 50 v et f=5 hz

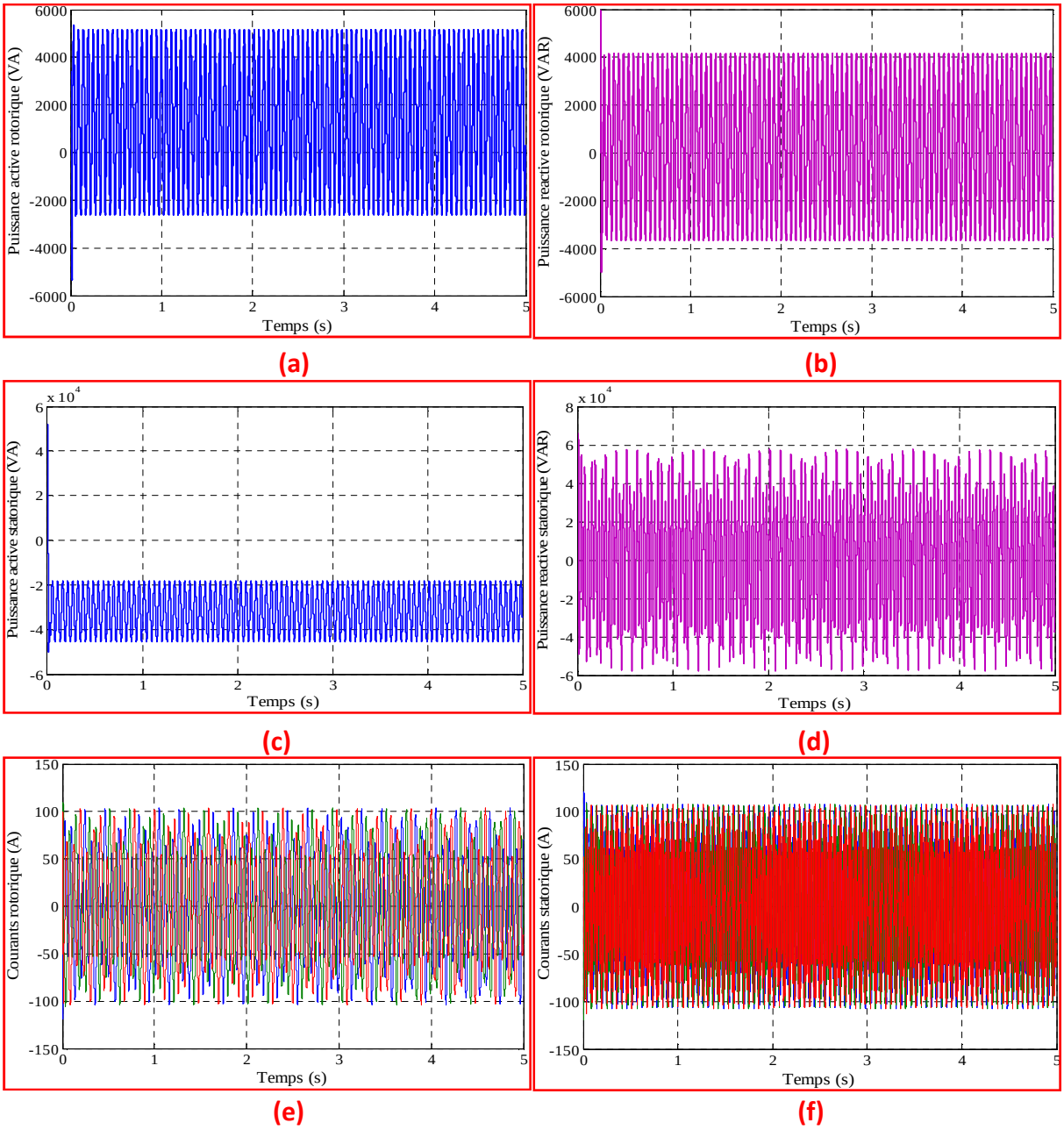


figure (II.9) : résultat de simulation en mode hyper synchrone : (a) : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

D'âpres la figure (II.9) : on distingue que l'amplitude des puissances active et réactive statorique et rotorique augmente, ainsi les courants tandis que la fréquence reste la même que le teste précédent

On constate aussi qua la variation de la tension influe sur l'amplitude est la plage oscillatoire des grandeurs statorique et rotorique

On conclue que dans le mode hyper-synchrone la puissance mécanique fournie a la machine est transmise par le stator une partie de cette puissance est transmis par le rotor

- Pour ω : variable

la figure ci-contre (II.10) montre la Courbe des variations de ω en fonction de temps

Dans ce teste on va modifier trois fois la vitesse ω (Hypo-synchrone, hyper-synchrone et synchrone) et cela dans une seul courbe par la suite on va modifier la fréquence et la tension pour voir les changements apporter aux caractéristiques

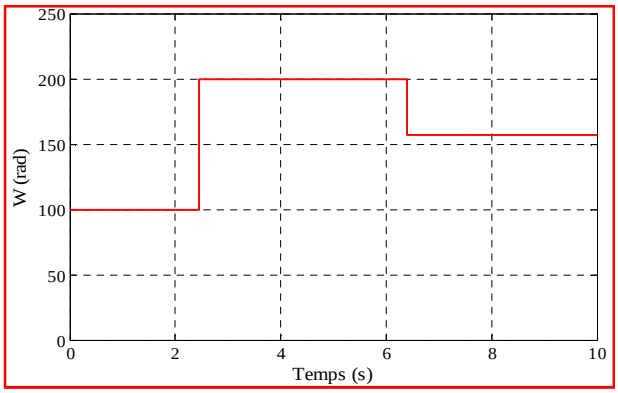
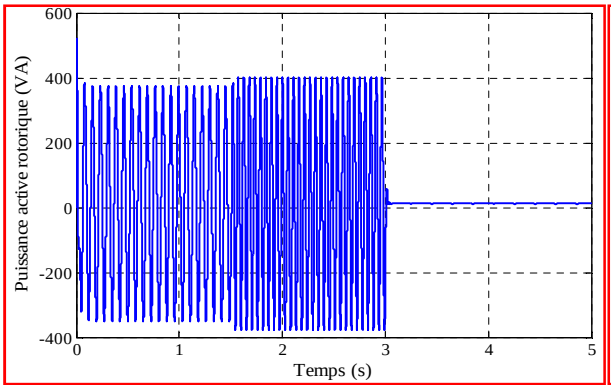
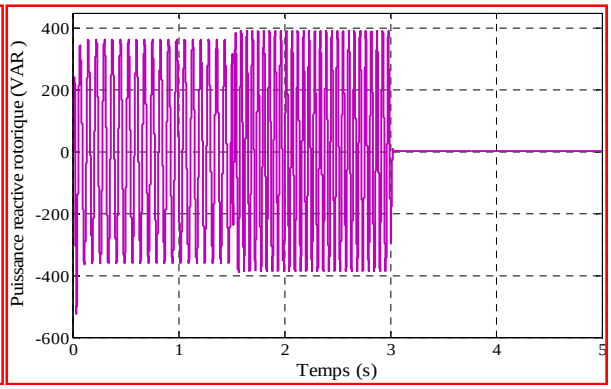


Figure (II.10) : courbe qui montre la variation de la vitesse en fonction de temps

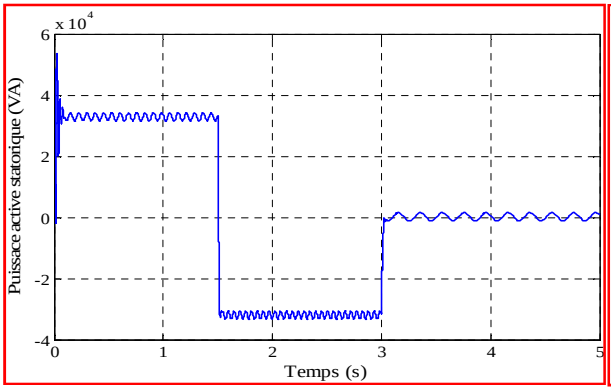
- Pour Vr=5 v , fr=5 hz



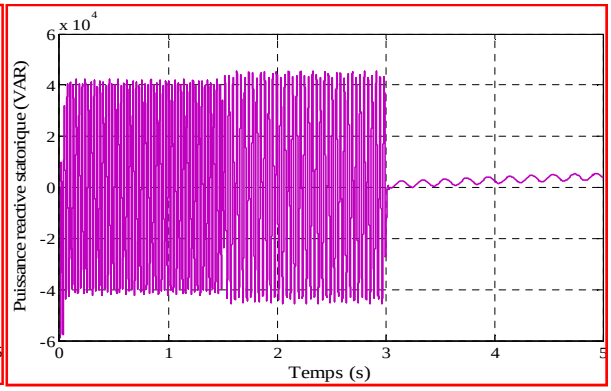
(a)



(b)



(c)



(d)

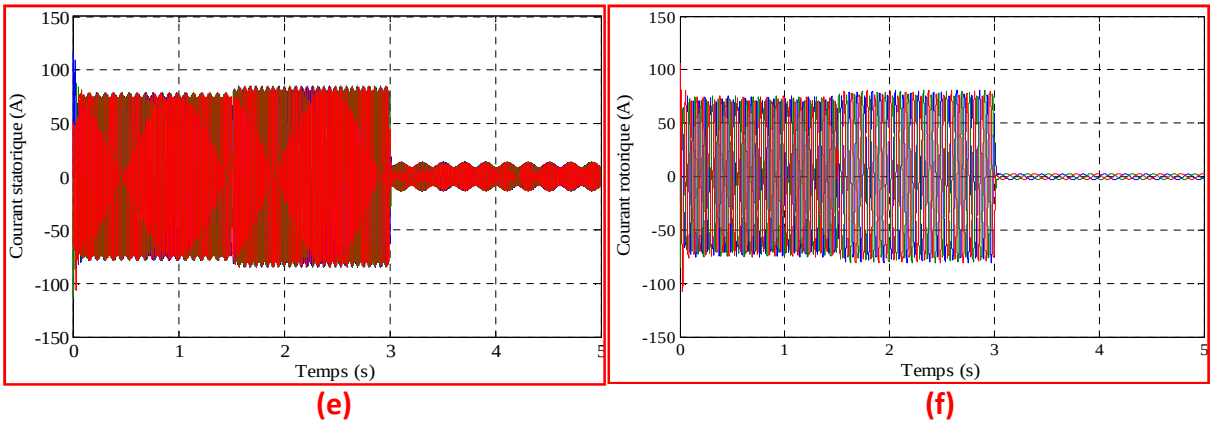
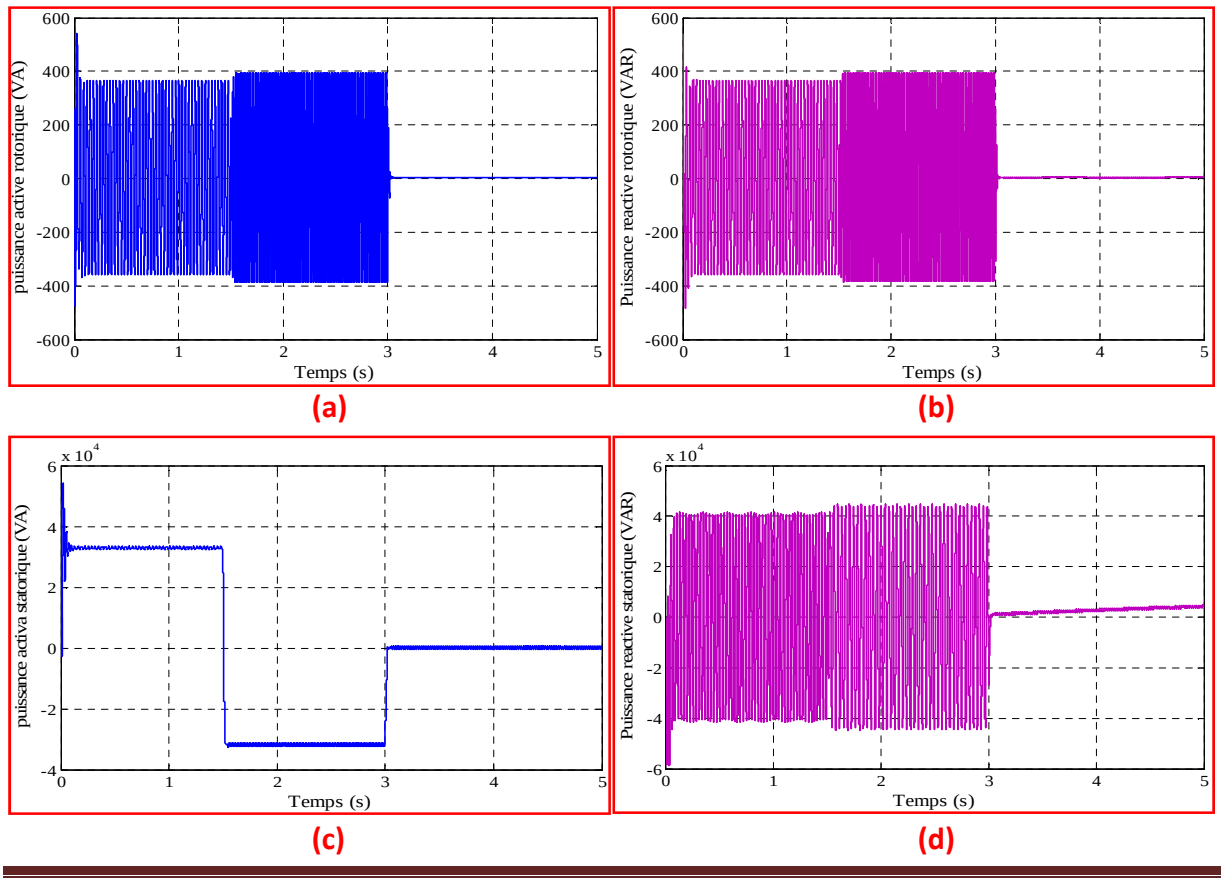
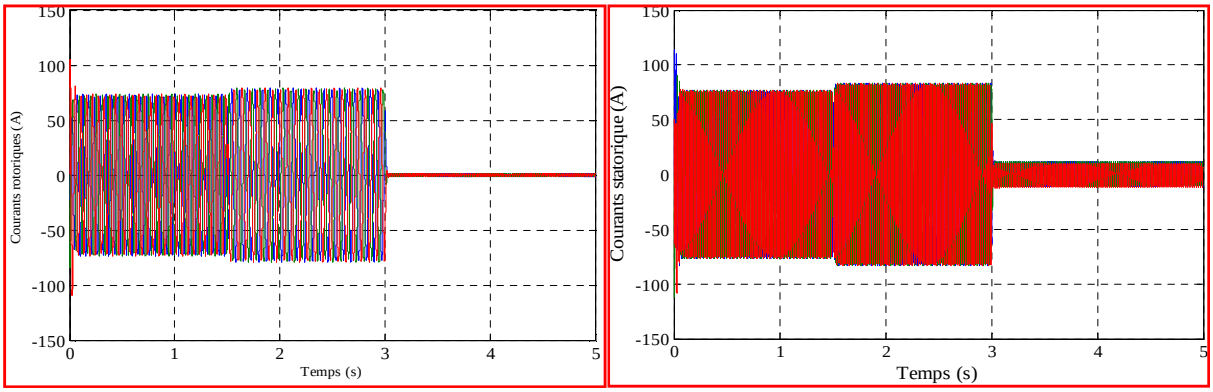


Figure (II.11) : Résultat de simulation pour ω variable : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

On distingue de la figure (II.11) que la puissance active et réactive rotorique ainsi la puissance réactive statorique et les courants ont des courbes alternative qui changent légèrement d'amplitude entre le teste hypo et hyper synchrone et ils s'annulent au synchronisme , tandis que la puissance active statorique aura une valeur continu positive puis négative qui change significativement avec le teste hypo-synchrone et hyper-synchrone , elle s'annule a son tour pour la vitesse de synchronisme

- Pour ω : variable, Vr=5 v , fr=50 hz



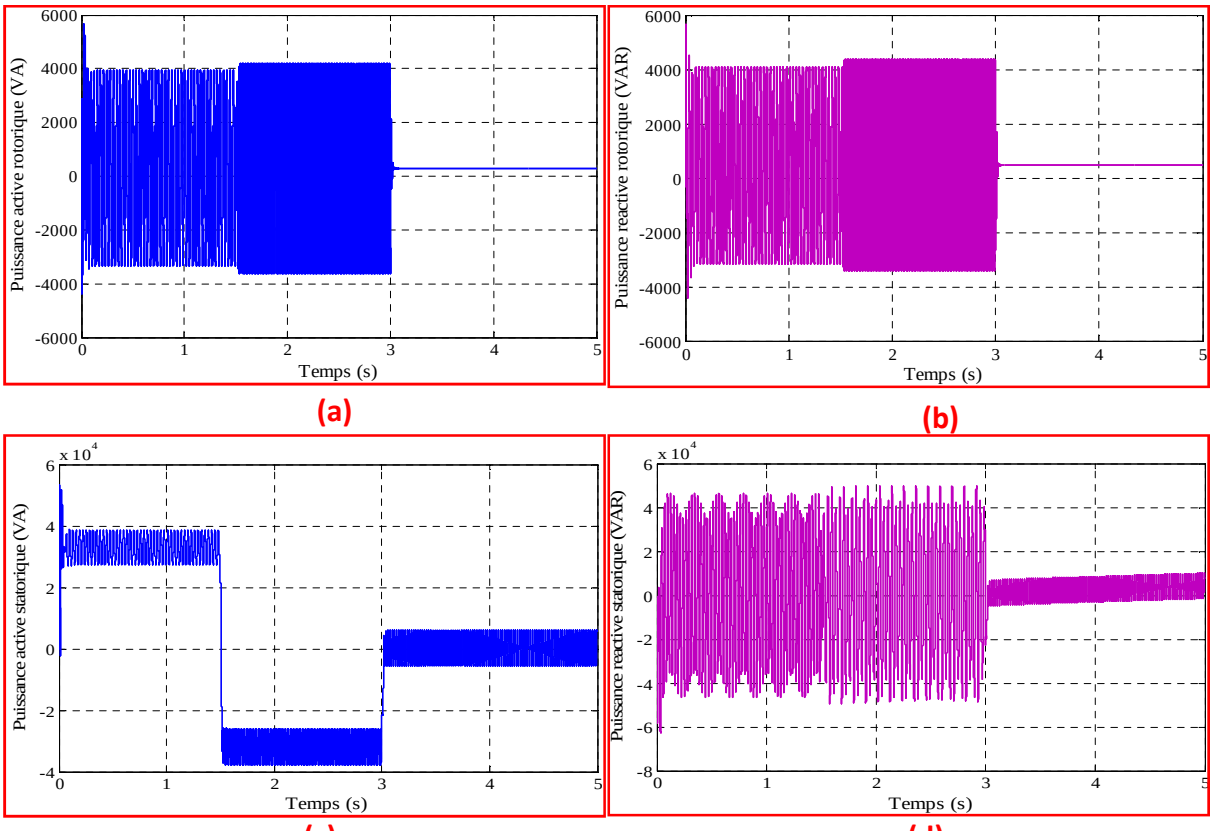


(e) (f)

Figure (II.12) : Résultat de simulation pour ω variable : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

On remarque d'âpres la figure (II.12) que le changement de fréquence n'as pas d'influence sur l'amplitude des puissances active ou réactive, mais par contre elle influe sur la fréquence des ondulations

- Pour ω : variable, Vr=50 v , fr=50 hz



(a) (b)

(c) (d)

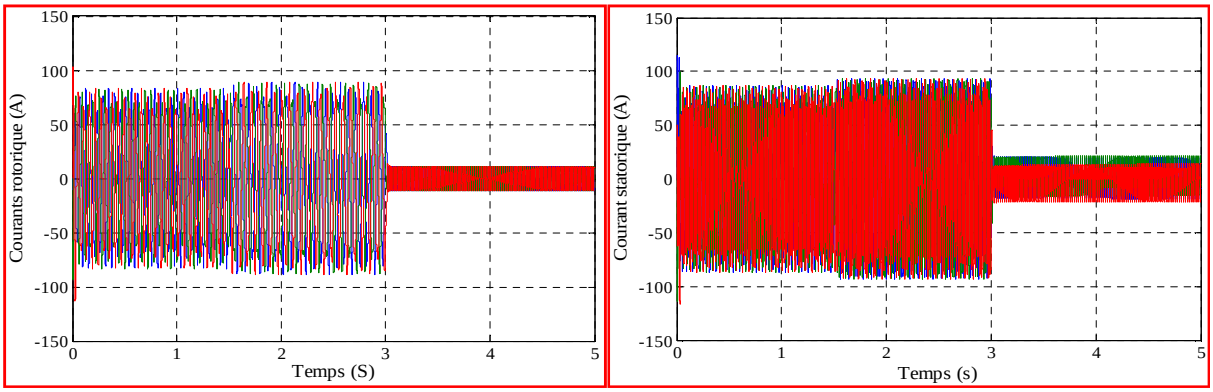


Figure (II.13) : résultat de simulation pour ω variable : (a) : puissance active rotorique, (b) : puissance réactive rotorique, (c) : puissance active statorique, (d) : puissance réactive statorique, (e) : courant rotorique, (f) : courants statorique

D'âpres la figure (II.13) on distingue que le changement de la tension influe sur la plage de variation des amplitudes des puissances actives et réactive tandis que la fréquence des ondulations restent pratiquement la même

II.4.3 Conclusion des testes

D'âpres les testes précédent on conclue que

- la variation de tension d'alimentation de rotor influe sur l'amplitude des puissances active et réactive, ainsi sur la plage des oscillations
- Le changement de la vitesse en hypo-synchrone ou hyper synchrone influe significativement sur la puissance active statorique
- la totalité des puissances fournie a la MADA ou générer sont transmise via le stator, juste une partie de ces puissance sont transmise par le rotor

II.5 Alimentation des convertisseurs Multiniveaux

Dans cette partie nous introduisons un convertisseur Multiniveaux bidirectionnelle en courant qui alimentera le rotor de la MADA

II.5.1 Onduleur Multiniveaux

II.5.1.1 Structure générale

Le convertisseur utiliser dans cette simulation est un onduleur Triphasé a cinq niveau structure NPC a diode flottante qui est constitué de trois bras identique , chaque bras comporte huit interrupteurs (IGBT) en série et au moins 6 diodes , chaque interrupteur est constituer d'un transistor et d'une diode monté en tète bèche (donc bidirectionnel en courant) qui sera commande Par la technique MLI , le convertisseur est alimenté par une source continue de 620 V , qui se devise par 4 sources continue identiques de 155 V

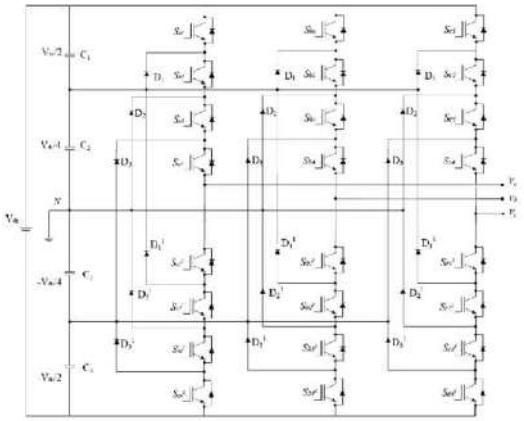


Figure (II.14) : montre structure d'un onduleur 5 niveau a diode flottante

II.5.1.2 Commande complimentaire

Pour eviter les court circuit des sources de tensions par conduction de plusieurs interrupteurs et pour que les convertisseurs soit totalement commandable , on adopte une commande complementaire

Soit un bras de la structure de la figure (II.12) , on dispose de plusieurs commande complementaire sont possibles elles peuvent etres resumer par le systemesuivant

$$\begin{cases} B_{k1} = \overline{B_{k5}} \\ B_{k2} = \overline{B_{k6}} \\ B_{k3} = \overline{B_{k7}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k8}} \end{cases} \qquad \text{(II.43)}$$

Le tableau suivant montre l'etat des interrupteurs et les differents tension de sortie

Ou les etats :

$$\begin{cases} 0 : \text{ veut dire que l'interrupteur est ouvert (bloquer)} \\ 1 : \text{ veut dire que l'interrupteur est fermer (passant)} \end{cases}$$

Configuration	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	Vs
E_0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E_1	1	1	1	1	0	0	0	0	$V_{dc}/2$
E_2	0	1	1	1	1	0	0	0	$V_{dc}/4$
E_3	0	0	1	1	1	1	0	0	0
E_4	0	0	0	1	1	1	1	0	$-V_{dc}/4$
E_5	0	0	0	0	1	1	1	1	$-V_{dc}/2$

Tableau (II.1) : états des interrupteurs pour chaque configuration

Donc il y'a cinq niveau de tensions ($V_{dc}/2$, $V_{dc}/4$, 0 , $-V_{dc}/4$, $-V_{dc}/2$)

II.5.1.3 Commande MLI (triangulo-sinusoïdal) :

Le principe de cette stratégie de commande, est de comparer le signal de référence ou modulante $V_{réf}$ de forme sinusoïdal de fréquence (f) avec le signal de porteuses V_p de forme triangulaire de fréquence (fp), cette comparaison compte sur les intersections des deux signales

On utilise dans cette commande 4 porteuse puisque l'onduleur est de 5 niveaux, il y'a plusieurs configuration de disposition des porteuses dans notre cas on a choisi 4 porteuse décalée en tension **PH disposition**, les porteuse sont en phase

Cette stratégie est caractérise par :

L'indice de modulation $m= f_p/f$

Et le taux de modulation $r=V_{ref}/V_p$

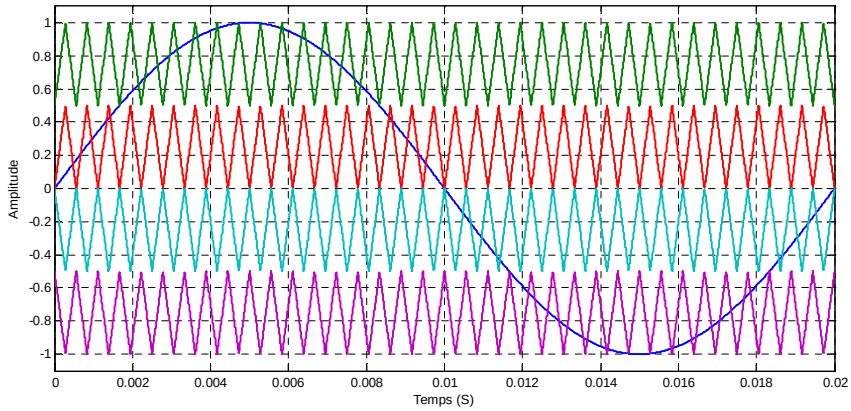


Figure (II.15) : montre la disposition des porteuse par rapport a la référence d'une commande MLI

a) Ordre de commutation des interrupteurs

L'algorithme MLI de commutation des interrupteurs d'un onduleur est base essentiellement sur l'intersection du signal de la porteuse avec celui de la référence, ces intersection avec un algorithme bien définit nous donnes des impulsions qui sert de gâchette pour les interrupteurs utiliser dans la structure de notre onduleurs

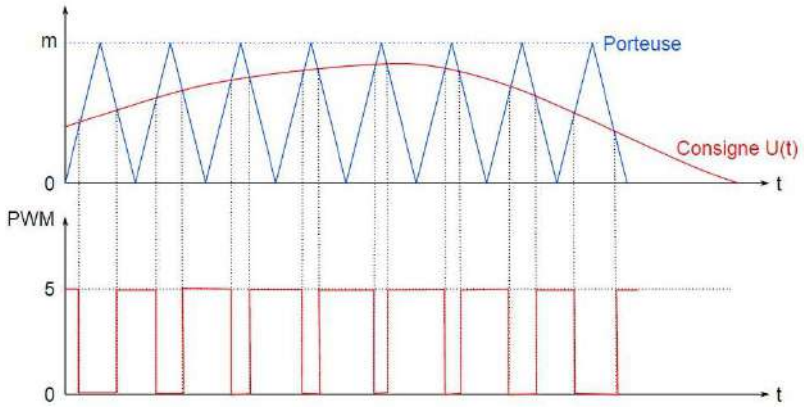


Figure (II.16) : le principe de la commande MLI

Pour un onduleur a cinq niveau les ordre de commutation peuvent être résumer comme suit

Si V_{ref} >= $V_{porteuse1}$ alors S_1=1 , S_5=0 si non S_1=0 , S_5=1

Si V_{ref} >= $V_{porteuse2}$ alors S_2=1 , S_6=0 si non S_2=0 , S_6=1

Si V_{ref} >= $V_{porteuse2}$ alors S_3=1 , S_7=0 si non S_3=0 , S_7=1

Si V_{ref} >= $V_{porteuse2}$ alors S_4=1 , S_8=0 si non S_4=0 , S_8=1

La figure qui suit montre le block Simulink pour la commande d'un seul bras

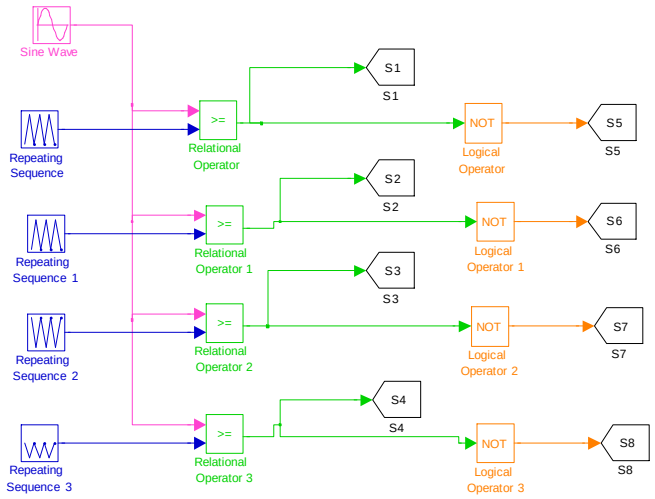


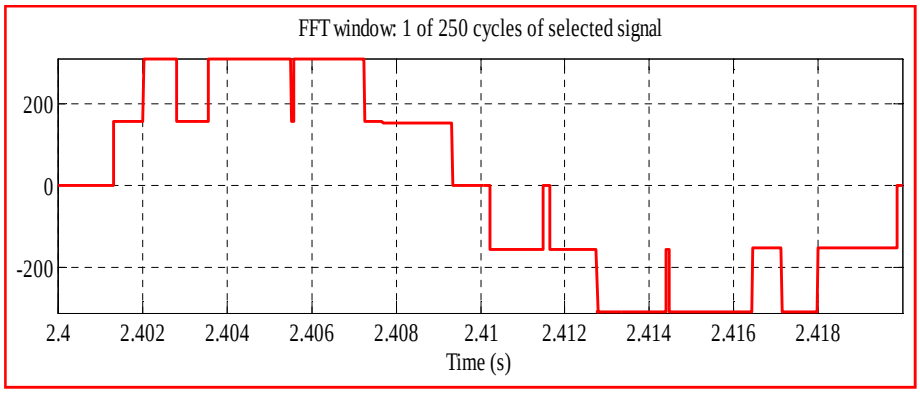
Figure (II.17) : Commande MLI d'un seul bras d'un onduleur 5 niveaux Sous MATLAB

II.5.1.4 Simulation et résultats

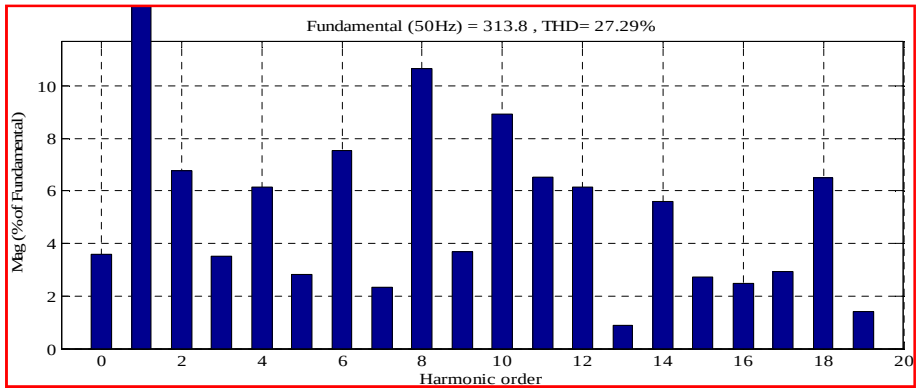
L'intérêt de la simulation est de voir l'influence de l'indice de modulation sur les caractéristique de la MADA ainsi sur le taux de distorsion d'harmonie THD des courant et tension statorique

Pour cela on fixe r=2 (comme indiquer sur la figure II.13) , et on change a chaque fois la valeur de m (9,12,21,36) les résultats obtenue sont comme suit

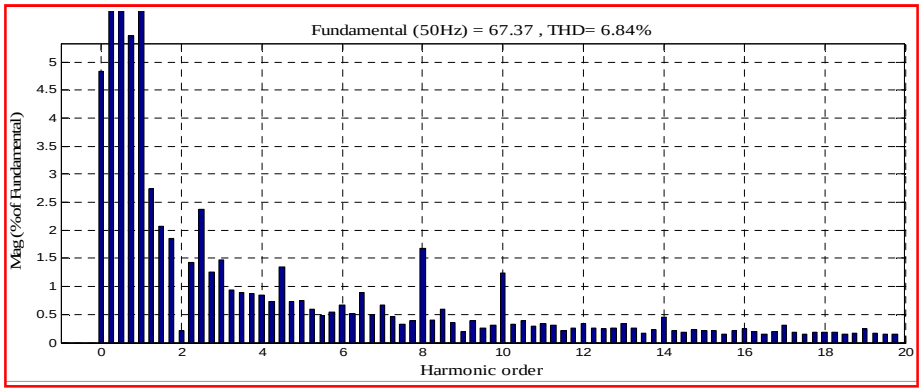
Pour m=9



(a)



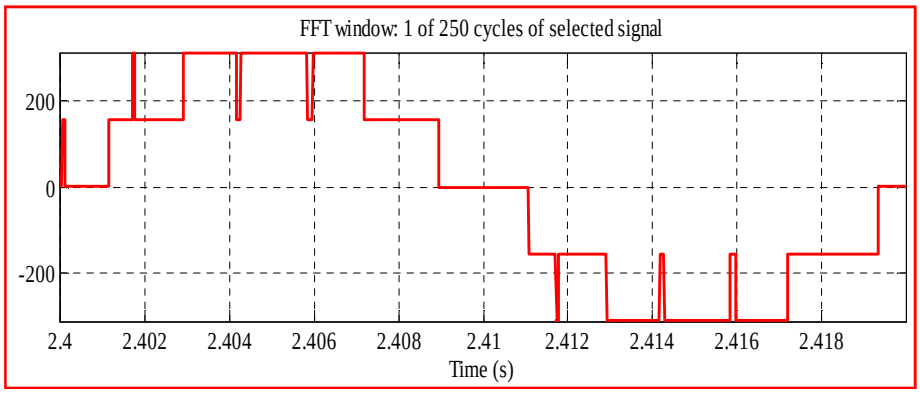
(b)



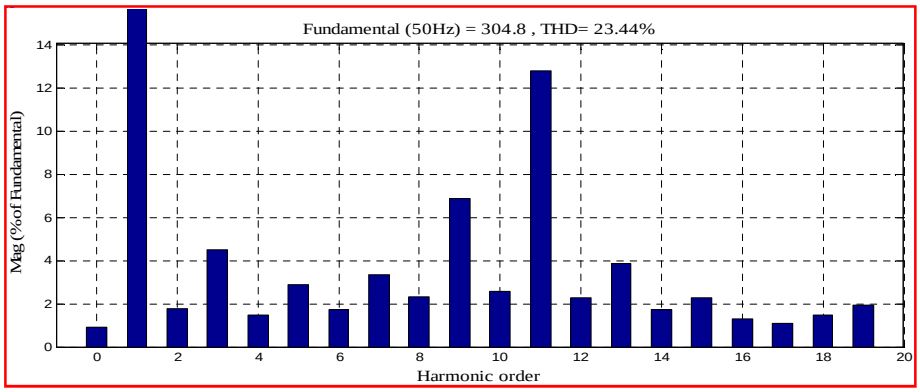
(c)

Figure (II.18) : montre résultat de la simulation dont, (a) : signal de la tension simple V_a , (b) : spectre des harmonies de la tension V_a, (c) : spectre des harmonies de courant I_a

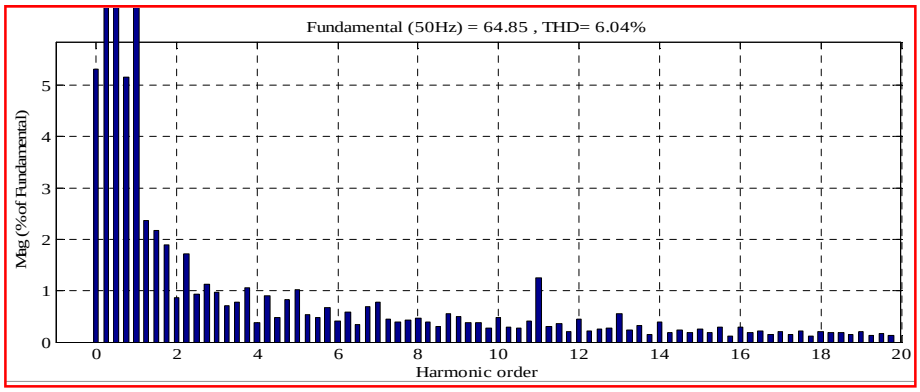
Pour m=12



(a)



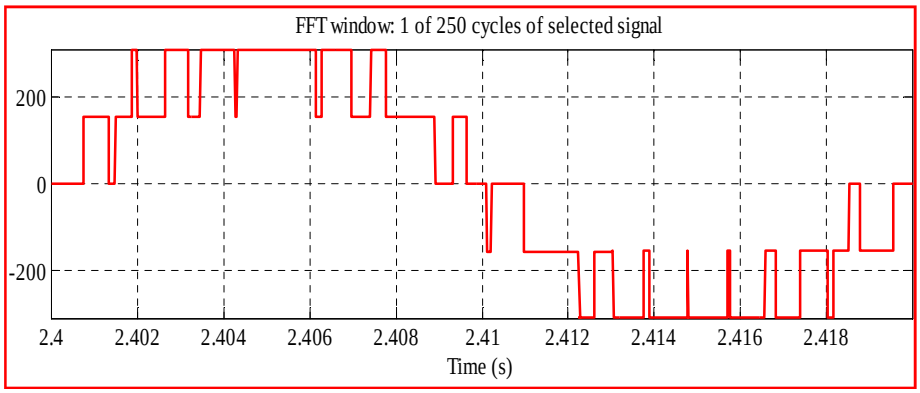
(b)



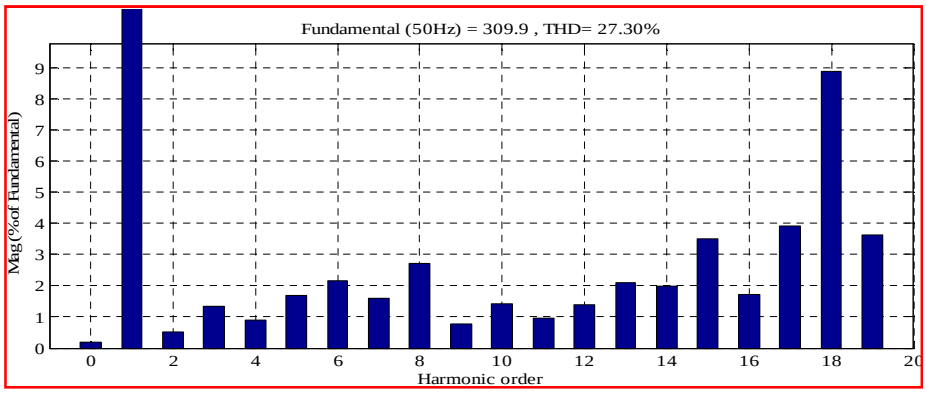
(c)

Figure (II.19) : montre résultat de la simulation dont (e): signal de la tension simple V_a , (f): spectre des harmonies de la tension V_a ,(g) ; spectre des harmonies de courant I_a

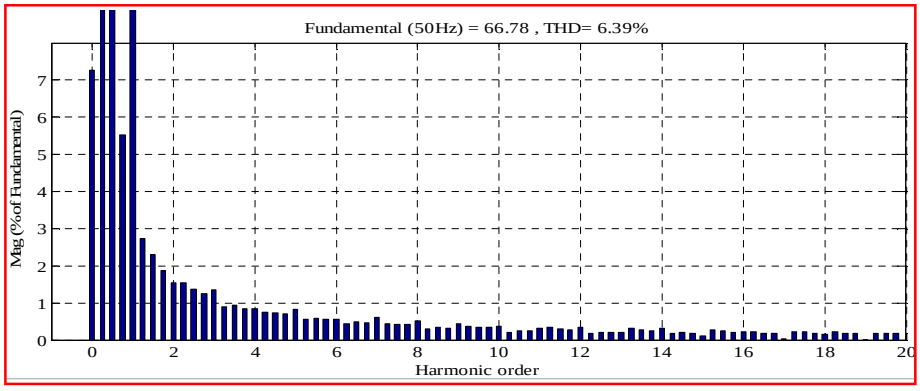
Pour m=21



(a)



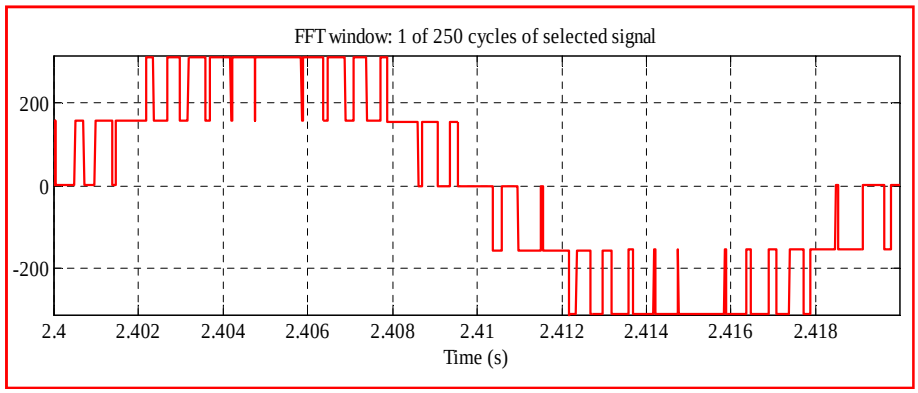
(b)



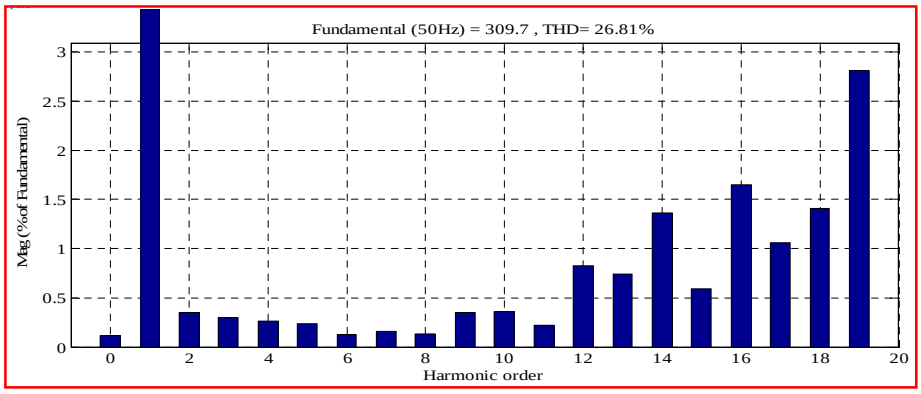
(c)

Figure (II.20) : montre résultat de la simulation dont (a): signal de la tension simple V_a , (b): spectre des harmonies de la tension V_a ,(c) ; spectre des harmonies de courant I_a

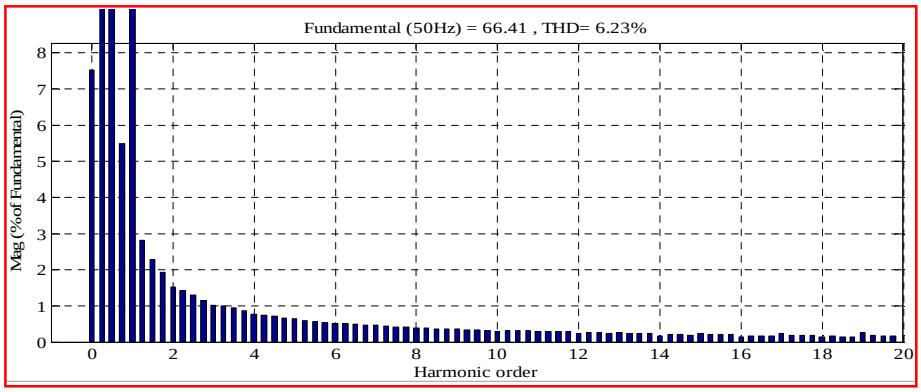
Pour m=36



(a)



(b)



(c)

Figure (II.21) : montre résultat de la simulation dont (a): signal de la tension simple V_a , (b): spectre des harmonies de la tension V_a ,(c) ; spectre des harmonies de courant I_a

D'après les figures précédente on remarque que l'allure de tension devient de plus en plus sinusoïdal pour une m=36 , ainsi le taux de THD est moins par rapport aux autres valeur de m

On constate depuis ces teste que plus la fréquence de la porteuse augmente plus les rangs des harmonies s'ordonne dans un seul endroit ce qui facilite leurs filtrage

Pour le reste de notre travaille on prend la valeur de l'indice de modulation (m=36)

II.5.2 Redresseur Multiniveaux

Une fois l'onduleur dimensionner et configurer ainsi que la commande MLI il est nécessaire de boucle (fermer) le système coté réseau par un convertisseur Multiniveaux (cote réseau) ou communément appeler redresseur multi niveau, et cela a fin que une partie de l'énergie électrique disponible sur le réseau sera transmis par les convertisseurs bidirectionnelle liées au rotor de la MADA comme il est indiquer dans le mode de fonctionnement de la MADA dans les quatre quadrants

II.5.2.1 Le but de redresseur

Les redresseur Multiniveaux sont devenue de plus en plus un moyen intéressant d'interfaçage avec le réseau électrique pour différentes application industrielle , ceci est du a la possibilité de réduction du contenu harmonique des courants prélevé sur le réseau , l'injection de courant harmonique dans le réseau provoqué par les ponts redresseurs a diode et a thyristor déforme la tension et induit des effets négatifs sur les récepteurs voisins et sur le réseau de distribution , de plus la dégradation de facteur de puissance liée au ponts redresseurs et a l'origine de l'augmentation de la consommation électrique et du cout pour les système classique

Le redresseur Multiniveaux représente une alternative performante pour résoudre les problèmes cités dans le paragraphe précédent par le biais de la commande des interrupteurs qui se substitue alors aux diode ou aux thyristor grâce a leur capacité de fonctionnement soit en mode redresseur soit en mode régénérateur [22]

II.5.2.2 Principe de fonctionnement

L'avantage principale du redresseur Multiniveaux par rapport aux autres convertisseur a absorption de courant sinusoïdal , vient de sa capacité a fonctionner en mode redresseur et en mode régénérateur en effet si la charge connecté au bus continu consomme de la puissance active le convertisseur fonctionne en mode redresseur (il prélève du réseau de la puissance active) si elle produit de la puissance active , le convertisseur fonctionne en mode régénérateur (il fournit de la puissance active au réseau) , lors de ces deux mode de fonctionnement la tension de bus continue est contrôlable en échangeant une partie de la puissance transite pour charge et décharge de condensateur [22]

La figure qui suit illustre les deux modes de fonctionnement de redresseur Multiniveaux

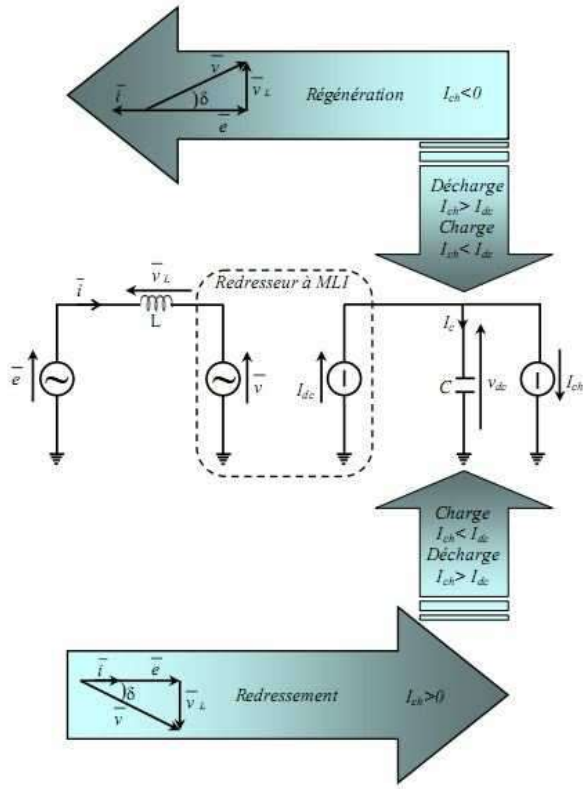


Figure (II.22) : les deux modes de fonctionnement d'un redresseur Multiniveaux [22]

Les première application de ces redresseur est dans le remplacement des redresseur a diode constituant l'étage d'entrée des variateur de vitesse, il peut être également utiliser dans les systèmes de production de l'énergie éolienne qui est notre sujet d'étude, les deux cas les plus répondu sont

- Les machine asynchrone a double alimentation ou le redresseur relie le rotor au réseau
- Les machine synchrone a aimants permanent, ou le redresseur est relier au stator

II.5.2.3 Commande par hystérésis

Le contrôle du courant par hystérésis consiste a maintenir le courant dans une bande enveloppant sa référence , chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation aux interrupteur , la figure (II.23) illustre le principe de contrôle du courant par hystérésis a bande fixe , la différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliqué a l'entré d'un comparateur a hystérésis dont la sortie fournie l'ordre de commande du bras correspondant [22]

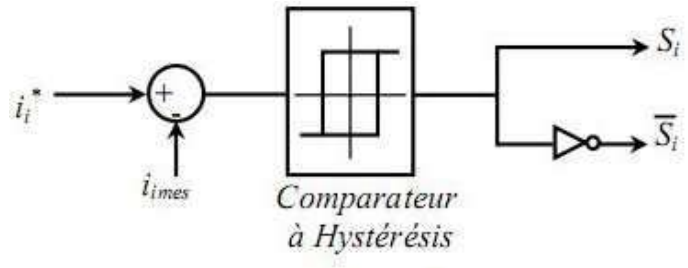


Figure (II.23) : principe de contrôle par hystérésis [22]

Cette technique de contrôle fait partie des commande non linéaire car elle fonctionne en tout ou rien , elle présente de nombreux avantage tel que le temps de réponse rapide la stabilité , la robustesse , ainsi la simplicité de mise en œuvre , car le seul paramètre de régulation est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur le courant et la fréquence de commutation , cette méthode est largement employer dans les applications contrôlé en courant tel que les entrainement électrique et les filtres actifs [22]

La figure sui suit montre la structure générale de la commande des redresseurs par hystérésis

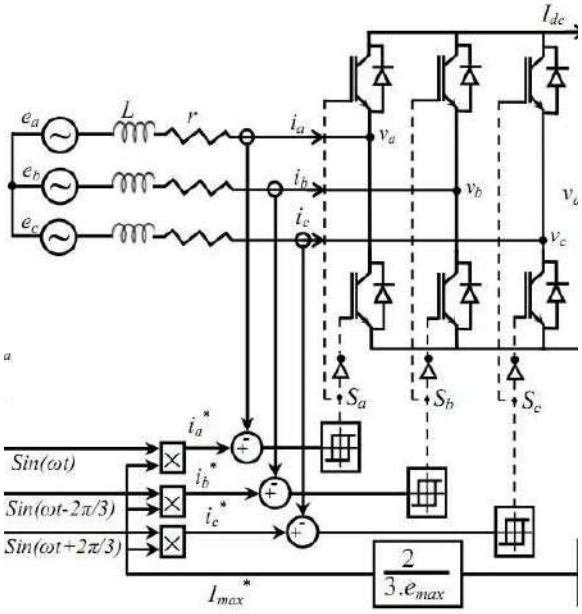


Figure (II.24) montre la structure générale de la commande d'un redresseur par hystérésis [22]

II.6 Conclusion

D’après ce chapitre on conclue que la chaine de conversion qui entre dans la production de l’énergie éolienne dont la MADA et les convertisseurs bidirectionnels ont un comportement bien spécifique, et cela grâce aux différents paramètres de réglage qui entre dans leurs commande ainsi leurs modélisations

La configuration et le bon dimensionnement de ces éléments, ainsi leur paramètre est très important pour l’optimisation de la production de l’énergie éolienne et aussi pour fournir une meilleure énergie en termes de qualité

Chapitre III

Commande vectorielle

III.1.Introduction

Le major problèmes des machines asynchrone réside dans le fait que le couple et le flux sont fortement couplés, donc tout action apporter sur l'une de ces variables répercute sur l'autres

L'objectif de la commande vectorielle c'est d'aboutir a un module simple de la machine asynchrone susceptible d'assurer le contrôle indépendant des grandeurs flux et courant et d'orienter leur vecteurs (flux et courant) a fin de rendre le comportement de la MADA similaire a celui de la machine a courant continue a excitation séparer ou le courant d'inducteur contrôle le flux et le courant d'induit contrôle le couple , donc le courant Idr sera analogue a celui de courant d'inducteur et Iqr est analogue au courant d'induit , par conséquence les deux courant sont mutuellement découplés

III.2.Modèle de contrôle indépendant des puissances

Pour pouvoir contrôler la production d'électricité de l'éolienne on va contrôler indépendamment les puissances active et réactive et établir un system d'équation qui relie les tensions rotorique, générées par un onduleur, aux puissances active et réactive statorique

On utilise donc le model diphasé décrit dans le chapitre 2 et on l'oriente le repère (d,q) a fin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique ϕ_s [5][6][10]

Du cout on aura :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = 0 \end{cases} \quad \text{(III.1)}$$

Dans l'hypothèse ou le flux ϕ_{sd} est maintenant constant (ce qui est assure par la présence d'un réseau stable connecte au stator) les expressions des tensions statorique (II.28) deviennent comme suit

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad \text{(III.2)}$$

si on néglige la résistance des enroulement statorique, hypothèse réaliser pour les machine de forte puissance utiliser dans la production éolienne, les équations des tensions statorique (II.28) de la machine se réduisent a

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = \omega_s \phi_{sd} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

Dans ce cas l'expression de couple électromagnétique (II.33) devient

$$C_{em} = p(\phi_{sd} i_{sq}) \quad \text{(III.4)}$$

Les équations des puissances active et réactive statorique (II.34 et II.35) deviennent

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} i_{sq} \\ Q_s = V_{sq} i_{sd} \end{cases} \quad \text{(III.5)}$$

Les équations des flux statorique (II.28) deviennent

$$\begin{cases}\phi_{sd} = L_s i_{sd} + M i_{rd} = \phi_s \\ \phi_{sq} = L_s i_{sq} + M i_{rq} = 0\end{cases} \quad \text{(III.6)}$$

A partir de ces équations on peut écrire déduire les équations des courant statorique en fonction des courant rotorique comme suit

$$\begin{cases} i_{sd} = -\dfrac{M}{L_s} i_{rd} + \dfrac{\phi_s}{L_s} \\ i_{sq} = -\dfrac{M}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

On remplace ces équations dans ceux des flux rotorique en trouve

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left(L_r - \dfrac{M^2}{L_s}\right) i_{rd} + \dfrac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{rq} = (L_r - \dfrac{M^2}{L_s}) i_{rq} \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

On remplaçant aussi les équations des courants i_{sd} et i_{sq} dans ceux des puissance active et réactive statorique on trouve

$$\begin{cases} P_s = -V_s \dfrac{M}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = V_s \dfrac{\phi_s}{L_s} - \dfrac{V_s M}{L_s} i_{rd} \end{cases} \quad \text{(III.9)}$$

on tirant ϕs=Vs/ωs de la relation, l'expression de la puissance réactive sera

$$\phi_s = \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} - \frac{V_s M}{L_s} i_{rd} \quad \text{(III.10)}$$

On distingue d'après ces équations qu'il y'a un découplage entre la commande des puissances

La puissance active et commandé par la composante en quadrature du courant rotorique i_{rq} et la puissance réactive est commandé par la composante directe du courant rotorique i_{rd} [1]

Comme il est indiquer dans le mode de fonctionnement de la MADA (chapitre 1) que c'est la commande des tensions rotorique qui génère le champ magnétique (flux) a l'intérieure de la MADA ainsi de contrôler le facteur de puissance

pour cela on doit établir les relations entres les courant et les tension rotorique qui seront appliquer a la MADA

A partir des équations précédentes on peut déduire les équations des tensions rotorique comme suit

$$\begin{cases} V_{rd} = R_s i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)\frac{di_{rd}}{dt} - g\omega_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)i_{rq} \\ V_{rq} = R_s i_{rd} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)\frac{di_{rq}}{dt} - g\omega_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)i_{rd} + g\omega_s\frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad \text{(III.10)}$$

Ce système d'équation nous permet de schématiser le bloc qui montre les relations entre les tensions appliqué au rotor de la MADA et les puissances statorique que cela engendre

La figure qui suit montre le schéma de bloc de contrôle de la puissance de la MADA [1]

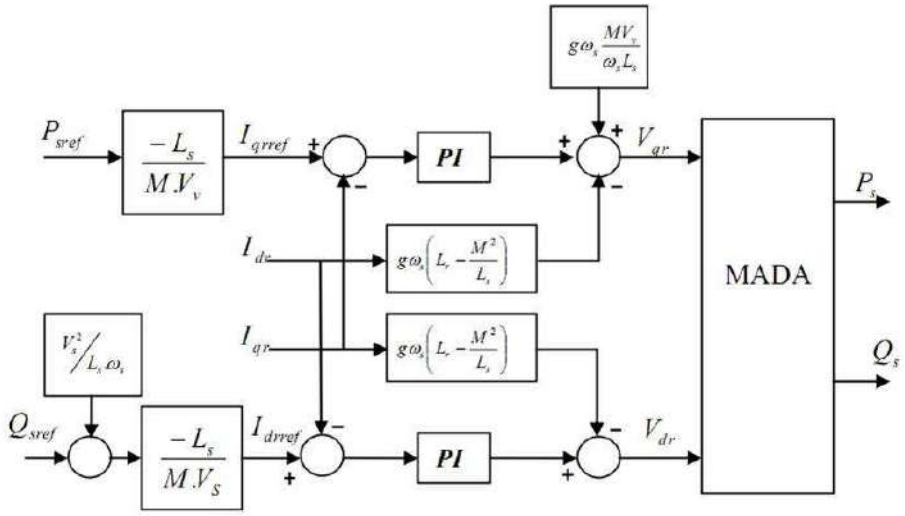


Figure (III.1) : schéma de block de commande de la MADA [1]

- Vrd et Vrq sont les composante diphasé des tensions rotorique a imposer a la MADA pour obtenir les courant rotorique voulu
- $g\omega_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)$ est le terme de couplage
- $g\frac{MV_s}{L_s}$ Représente une force électromotrice qui dépeint de la vitesse de rotation

On constate que les puissances et les tensions sont lié par une fonction de Transfer de première ordre, et comme la valeur du glissement (g) est faible on peut facilement réaliser une commande vectorielle, car les influence des couplage resteront faible, donc les axes d et q peuvent être commandé séparément avec leurs propres régulateurs

III.3.Commande vectorielle

Il apparait donc deux solutions (directe et indirecte) pour effectuer la commande en puissance de cette machine, selon le méthode d'estimation du vecteur flux rotorique

III.3.1.Commande directe

L'intérêt de cette méthode est la simplicité de mettre en œuvre consiste a négliger le terme de couplage et a mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances active et réactive [5][6][10]

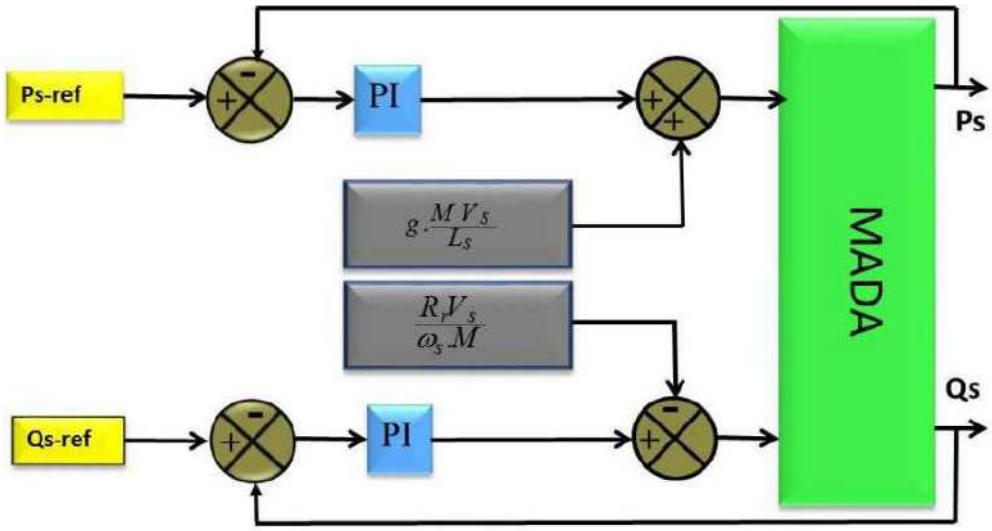


Figure (III.2) : montre schéma de la commande directe [2]

III.3.2.Commande indirecte

Cette méthode consiste a reproduire en sens inverse le schéma bloc du système a réguler (figure III.3) , on réalisant un schéma qui exprime les tension en fonction des puissances , tenant compte des termes de couplages et les compenser par un système qui comporte deux boucle de contrôle des puissances et courants rotorique [1][5][6]

A partir des systèmes des puissances active et réactive statorique du système (III.23) on déduit les références des courant rotorique directe et en quadrature suivant les relations ci-après

$$\begin{cases} i_{dr_ref} = \dfrac{V_s}{\omega_s M} - \dfrac{L_s}{MV_s} Q_{s_ref} \\ i_{qr_ref} = -\dfrac{L_s}{MV_s} P_{s_ref} \end{cases}$$

Ces courants seront utilisés comme référence a la place des références sur les puissances active et réactives, on aboutit alors a un schéma de bloc de la figure (III.3)

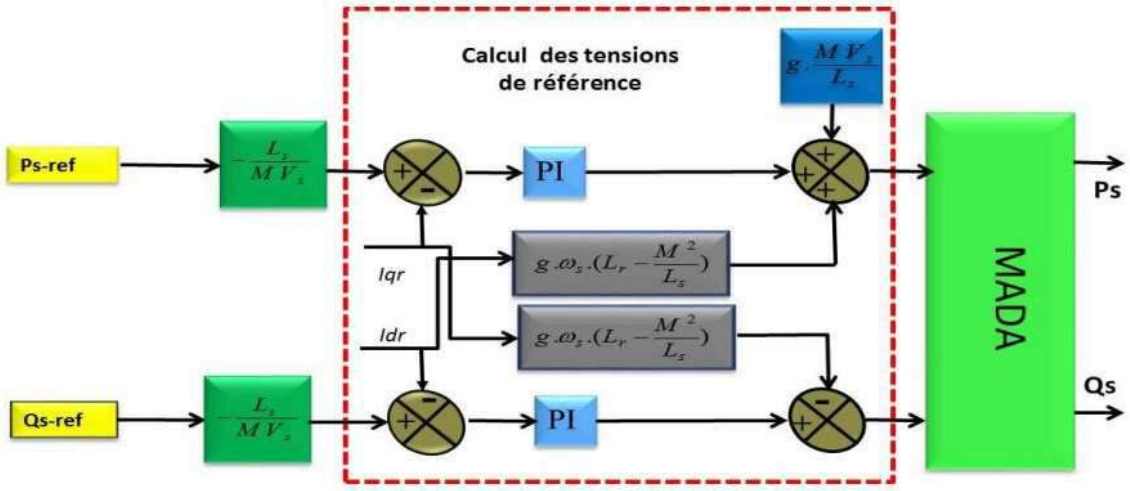


Figure (III.3) : Schéma de la commande vectorielle indirecte [2]

Cette configuration est fiable pour un réseau stable en tension et en fréquence, toute autre perturbation sur le réseau provoque une erreur sur le suivi des consignes, cette méthode utilise les courant rotorique d'axe d et q comme retour sur le comparateur [1][10]

Pour optimiser la régulation des puissances, nous allons mettre en œuvre deux boucle de régulation pour chaque axe , avec un régulateur PI pour chacune (un pour la boucle de puissance et l'autre pour celle de courant) ,

On aura donc un système de commande a 4 régulateur PI comme est indiquer dans la figure qui suit

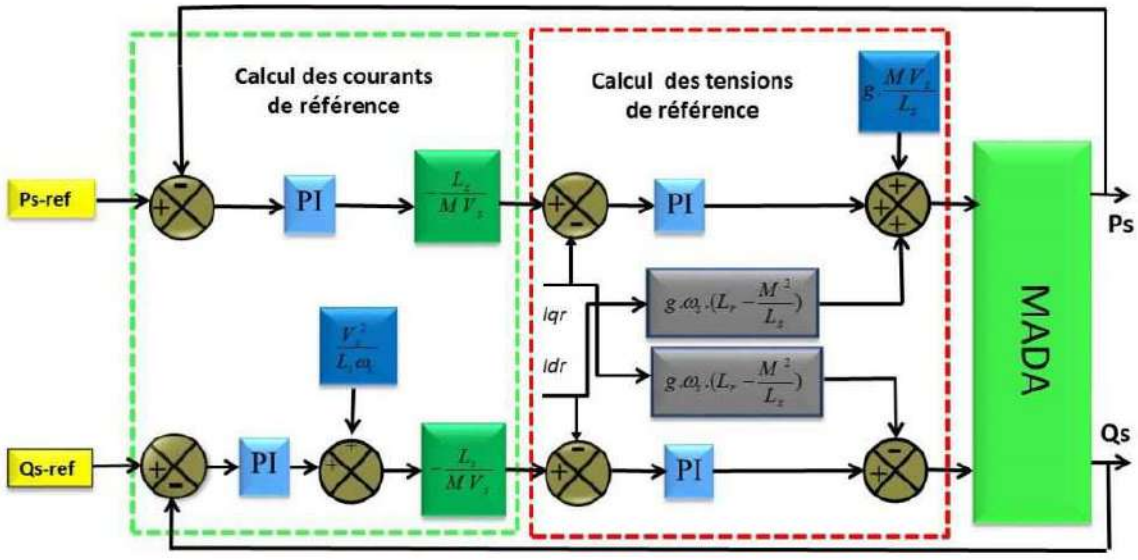


Figure (III.4) : schéma de la commande vectorielle indirecte avec boucle de puissance [2]

Cette méthode (structure) nous amène a un système de régulation plus complexe que les deux précédente structure car elle offre une meilleure robustesse aux perturbations du réseau électrique,

III.3.3.Dimensionnement du régulateur (correcteur)

Le régulateur utiliser dans ces commandes est un régulateur PI (proportionnel intégral), on l'a mis en œuvre grâce a sa simplicité et sa rapidité on offrant des performances acceptable

La figure qui suit montre un système régulé et corriger par un régulateur PI dont la fonction de Transfer est $K_p + \frac{K_i}{P}$ [1]

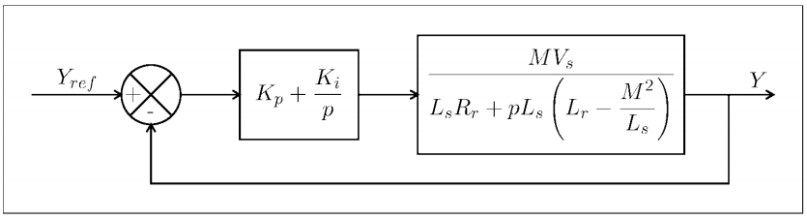


Figure (III.5) : schéma de système de régulateur PI [1]

Donc les gains des correcteurs peuvent être exprimés en fonction des paramètres de la MADA et du tempe de réponse (τ_r) comme il est indiqué dans les équation qui suit

$$K_p = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_s\left(L_r - \frac{M^2}{L_s}\right)}{MV_s} \quad \text{(III.11)}$$

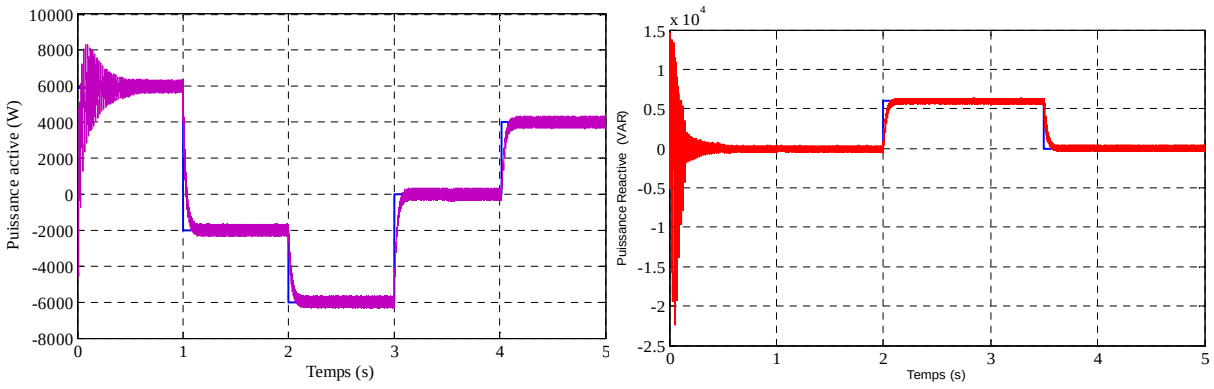
$$K_i = \frac{1}{\tau_r}\frac{L_sR_r}{MV_s} \quad \text{(III.12)}$$

Ces gains peuvent êtres calculer facilement a l'aide des paramètres de la MADA, puis affinés après la simulation, ils sont identique pour l'axe d et q [1]

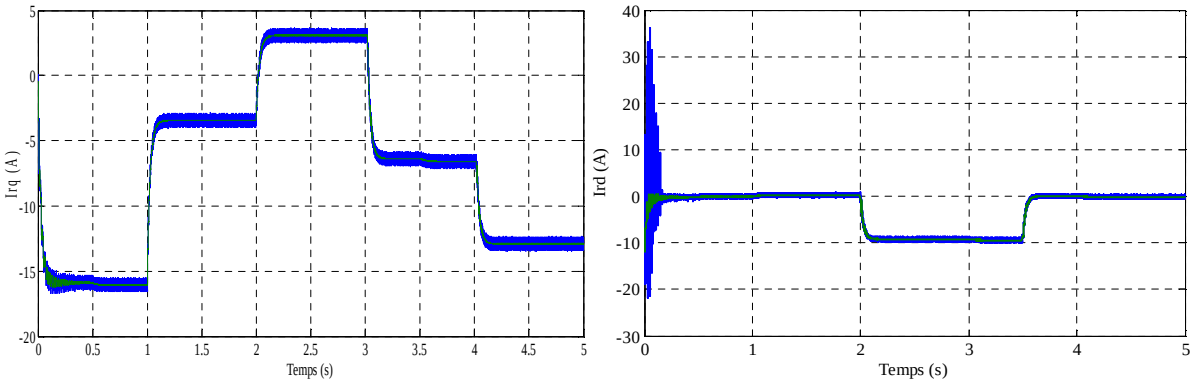
III.4.Simulation et résultats

III.4.1.Simulation de la commande indirecte

Dans ce qui suit on présente les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink de la commande vectorielle indirecte (figure III.4) effectué sur une MADA ayant les caractéristiques indiqué précédemment (Tableau II.1), les testes effectuer sont des testes de consignes de puissance active et réactive



(a) (b)

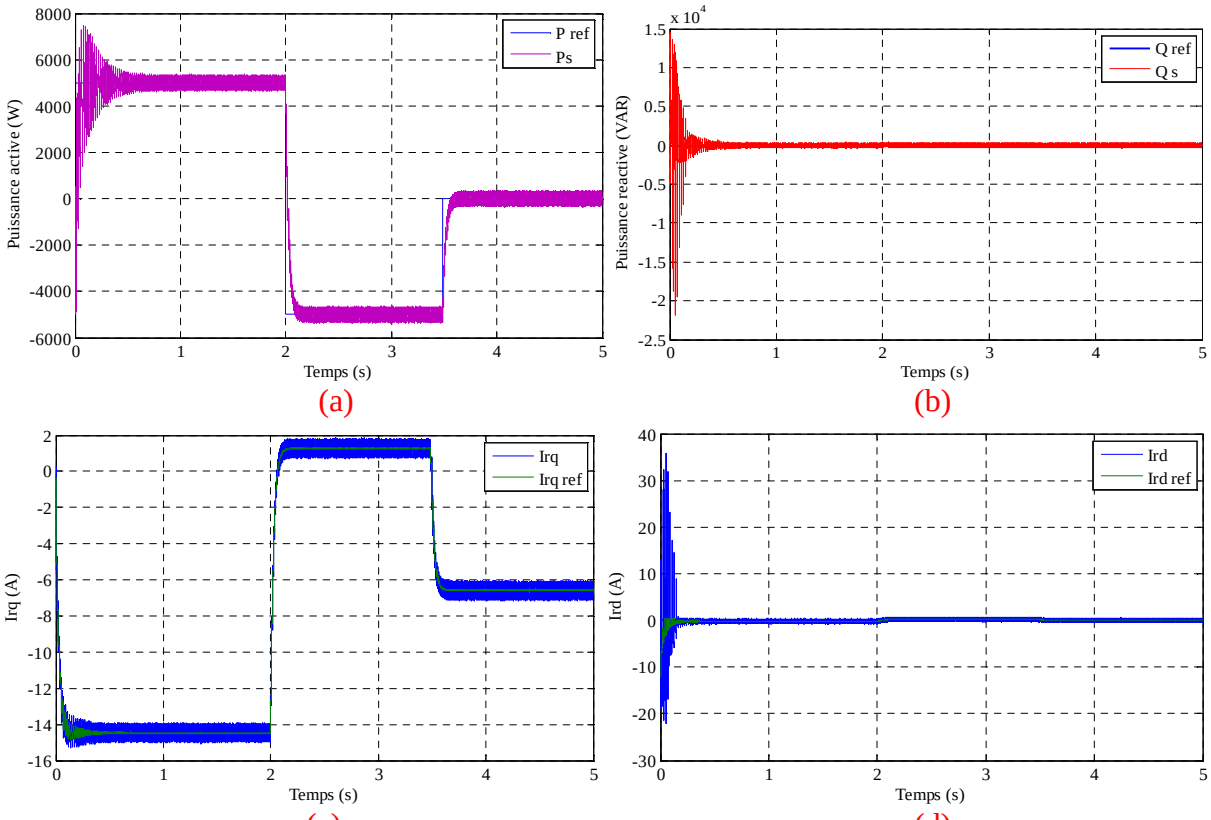


(c) (d)

Figure (III.6) : résultat de simulation de la commande indirecte avec, (a) : puissance active statorique, (b) : puissance réactive statorique, (c) : courant fictif directe, (d) : courant fictif en quadrature

D'après La figure (III.6) on voit que les consignes imposé sont bien suivi par les puissances actives et réactives et que notre système présente une dynamique satisfaisante

Pour s'assurer de la performance de notre stratégie de commande On prend des échelons différents avec une puissance réactive nulle pour avoir un facteur de puissance unitaire



(a) (b)

(c) (d)

Figure (III.7) : résultat de simulation de la commande indirecte avec, (a) : puissance active statorique, (b) : puissance réactive statorique, (c) : courant fictif directe, (d) : courant fictif en quadrature

D'après ces deux figures on distingue une dynamique qui réagit rapidement et sans dépassement, les échelons (consignes) sont bien suivi, et on voit aussi que la puissance active statorique dépend de courant rotorique en quadrature i_{rq} et la puissance réactive statorique dépend de courant rotorique directe ird , et la aussi on trouve l'effet de couplage entres les deux axes de commande d et q

On constate alors que le couplage entre les deux puissances est très faible et peut perceptible , il ne devrait pas poser un problème pour la suite de l'exploitation de modèle

Cette méthode (ou structure) est alors plus performantes, donc on s'intéresse a cette méthode pour le reste de notre travaille

III.5.Régulation par réseau de neurone

III.5.1.Introduction

Cette partie consiste a introduire des nouvelles technologies de commande qui sont utiliser récemment dans le domaine de l'électrotechnique et aussi en électronique de puissance, il s'agit donc des technique basé sur l'intelligence artificielle (logique flou, réseau de neurone...), dans notre cas on utilise les réseaux de neurone pour réaliser la commande vectorielle indirecte de la MADA

On présente dans ce qui suit une brève description sur les réseaux de neurones puis on va entamer la procédure de régulation par réseaux de neurones

III.5.2.Neurone

L'origine des neurones remonte aux essai de modélisation de neurone biologique réaliser par Warren McCullock et Walter pitts, ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurones et que la pensée née grâce a l'effet collectif d'un réseaux de neurones interconnectés [9]

La figure suivante montre un neurone formel

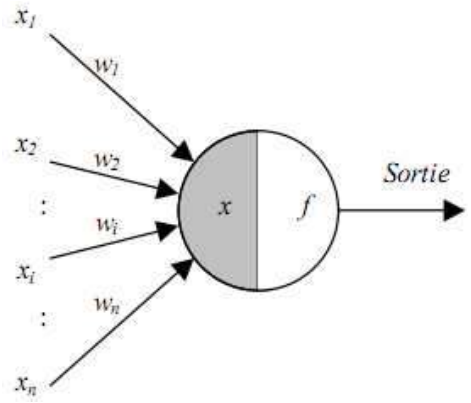


Figure (III.8) : un neurone formel [9]

Un neurone a plusieurs entrées Xi (i=1,n) , (autant que voulu) et une seule sortie. Les valeurs des entrées passent dans une fonction mathématique et le résultat donne la valeur de sortie du neurone. Cette fonction est paramétrable pour chaque neurone.

Généralement, cette fonction est la somme des entrées x pondérée par des poids w et à laquelle on soustrait un seuil S. Le résultat étant borné entre 0 et 1 par une fonction F.

Ce qui nous donne en formule : pour n entrées :

$sortie = f(x)$ Avec $x = \sum_{i=1}^{n} w_i x_i$

III.5.3.Réseau de neurones

Un réseau de neurones est la connexion de plusieurs neurone entres eux par l'intermédiaire des poids qui jouent le rôle des synapses, La version la plus simple consiste à faire des couches de neurones, en sachant que chaque couche reçoit en entrée de ses neurones les sorties des neurones de la couche précédente. De plus, les neurones de la 1ère couche vont recevoir en entrée les informations concernant notre problème. Les neurones de la dernière couche nous donneront le résultat en sortie.[9]

L'information est portée par le biais des poids, tandis que la structure du réseau de neurone ne sert qu'à traiter cette information et l'acheminer vers la sortie

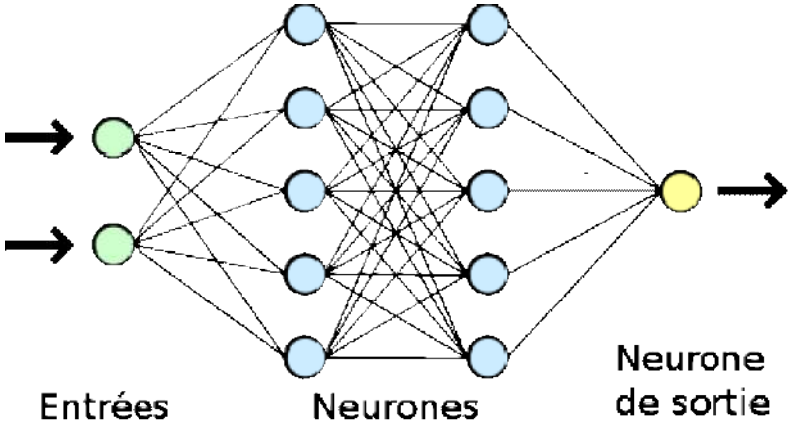


Figure (III.9) : structure d'un réseau de neurone

III.5.4 Perceptron multicouche

Ce sont les réseau de neurones les plus connus , un perceptron est un réseau neurones artificiel du type *feedforward* , c'est-à-dire a propagation directe , les plus simple sont constituer de trois couches , la première est celle des entrées (elle n'est cependant pas considérée comme couche neuronale par certains auteurs car elle est linéaire et ne fait que distribuer les variables d'entrées) , la deuxième est dite couche cachée (ou couche intermédiaire) elle représente le

cœur de réseau de neurones , la troisième , constitue un seul neurone est celui de la sortie , appelée couche de sortie , sa fonction d'activation est du type linéaire bornée [9]

III.6.Commande par réseau de neurone

L'idée est simple, elle consiste a remplacer le régulateur PI par un régulateur basé sur les réseaux de neurones (régulateur neural), comme il est indiquer dans la description qu'un neurone nécessite une ou plusieurs entrée et admet qu'une seul sortie, dans notre cas le neurone reçois une seule variable d'entrée est une seul sortie qui sont en réalité les entres et les sortie du régulateur PI

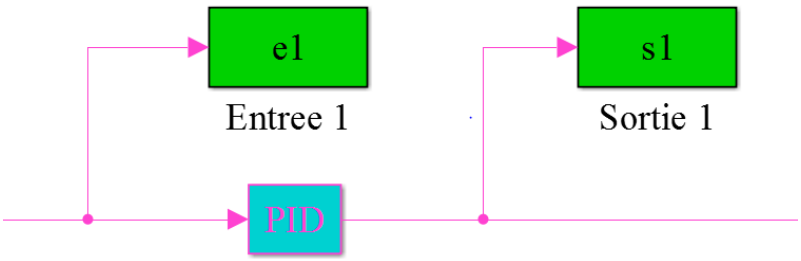


Figure (III.10) : extraction des vecteurs d'entrée et de sortie d'un régulateur PI

III.6.1.Simulation

La simulation se fait toujours par le logiciel MATLAB/Simulink, on place d'abord des blocks (to workspace) avant et après chaque régulateur PI pour relever les variable d'entres ainsi ceux de sortie comme il est indiquer dans la figure (III.10), puis on lance la simulation de la commande vectorielle indirecte avec les régulateurs PI

Une fois la simulation est terminé et bien sur les variable d'entre et de sortie de chaque régulateur sont donc sauvegarder comme des vecteur grâce au composant (to workspace), on procède ensuite a l'apprentissage de ces résultat par réseau neurones pour obtenir un régulateur neural capable de remplacer notre régulateur PI et qui s'adapte aux résultats , on utilise donc l'outils nftool pour procéder a l'apprentissage en posant les vecteurs des entrée comme des valeur d'entrés (input) de notre neurone et les vecteurs de sortie comme des valeur désirés ou ciblés (target) ensuite on va choisir le nombre des neurone de la couche cacher puis on entraine le neurone pour qu'il s'adaptent aux résultat

III.6.2.Résultats de simulation

La simulation de la commande vectorielle indirecte dans cette partie est réaliser par le logiciel MATLAB/Simulink on remplaçant les régulateurs PI configurer auparavant par des régulateurs base sur les réseaux neurone et qui sont entrainer comme il est expliquer précédemment, les caractéristiques de la MADA sont les même

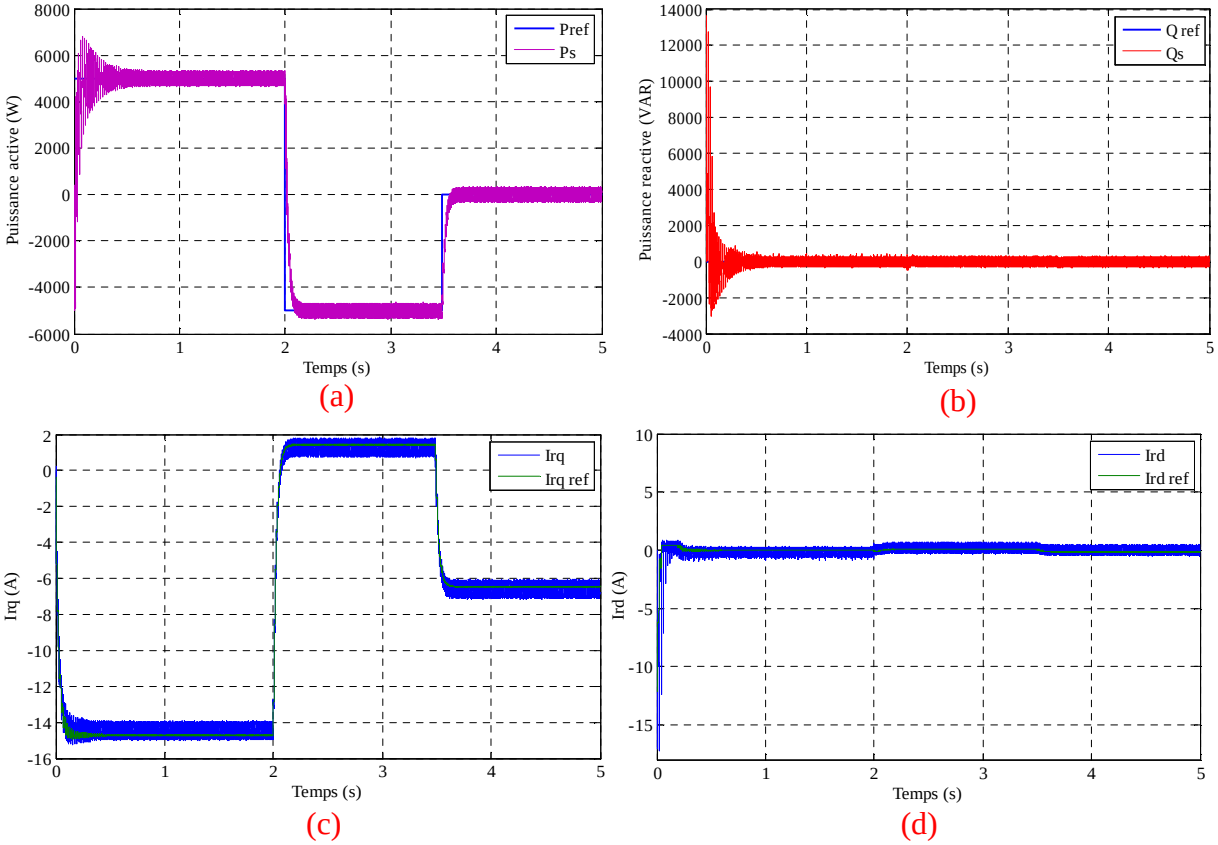


Figure (III.11) : résultat de simulation par réseau de neurone dont, (a) : Puissance active (b) : puissance réactive, (c) : courant fictif en quadrature irq, (d) : courant fictif directe ird

On distingue d'après les figures précédente, que les échelons imposé sont aussi suivi par les régulateurs neurone remplacer, cela signifie que les régulateur sont bien structure et bien entrainer a imiter le comportement des régulateur PI, pour réagirai a tout autre modification des échelons a imposé

III.7.Conclusion

On conclue de ce chapitre que le comportement de la MADA peut être ramené a celui de la machine asynchrone a excitation séparer grâce a la commande vectorielle en puissance

On a vu aussi qu'il existe plusieurs méthodes de commande soit simple ou complexe voir plus performant, qui résoudre le problème de couplage

A la fin de ce chapitre on a introduit un système d'intelligence artificielle base sur les réseaux de neurones pour réaliser la commande vectorielle indirecte de la MADA

Chapitre IV

Filtre active parallèle

IV.1 Introduction

L'énergie électrique produite par les aérogénérateurs ou n'importe quel autre source est distribuer par le réseau électrique sous forme de trois tensions constituant un système triphasé, ces tension ont des caractéristiques bien définit comme la fréquence (50 ou 60 Hz), le forme d'onde qui doit être sinusoïdal, et cela pour satisfaire le consommateur en lui fournir une bonne énergie en terme de qualité

Le consommateur exploite cette énergie sous différente forme (CC ou CA) qui dépend des appareil électrique ou électronique utiliser , la différence de la nature d'énergie soit produite ou consommer nécessite un développement a base d'électronique de puissance pour que la charge s'adapte a la source , ceci conduit a augmenter le nombre des charge non linéaire qui sont connecte au réseau électriques , ces dernier absorbent des courant non sinusoïdaux , cause principale de nombreuse perturbation sur les systèmes électriques ce qui provoque des courant harmonique qui se propagent dans le réseau

Il parait donc évident de limiter la propagation de ces harmonie a fin de stabiliser le réseau électriques, pour cela on va introduire un filtre active parallèle pour filtrer ces harmonie et fournir une énergie selon les normes

Cette partie de notre travaille est consacrer a l'étude de filtre actif, sa structure et sa commande pour atteindre l'objectif principale de n'importe quel production électriques qui est d'améliorer ces performances de compensation lorsque les conditions de fonctionnement du réseau électriques sont sévère

IV.2 Filtre actif parallèle

Le FAP consiste à ajouter en parallèle de la charge un dispositif commandable pour compenser les courants perturbateurs dus aux charges non linéaire de telle sorte que le courant de la source soit sinusoïdal [16][21]

Pour cela il faut tout d'abord identifier les courant perturbateur de la charge grâce a des technique bien définit puis injecter dans le réseau des courant harmonique de même amplitude et de phase opposée, que celui engendre par la charge , et une composante réactive de courant similaire a celle absorber par les composants de l'électronique de la charge non linéaire , a fin de maintenir le courant de ligne sinusoïdal et compenser la puissance réactive absorber

IV.2.1 Structure de filtre actif parallèle

Le FAP peut être diviser en deux parties , une partie de puissance et une partie de contrôle commande , dans la partie de puissance on trouve trois éléments dont l'onduleur est l'éliment fondamentale , on trouve aussi l'éliment de stockage et un filtre de sortie , quand a la partie contrôle commande , on trouve l'identificateurs des courant perturbateurs et la régulation des courant injecté par l'onduleur , la structure générale de filtre active parallèle est schématiser dans la figure suivante [16][20]

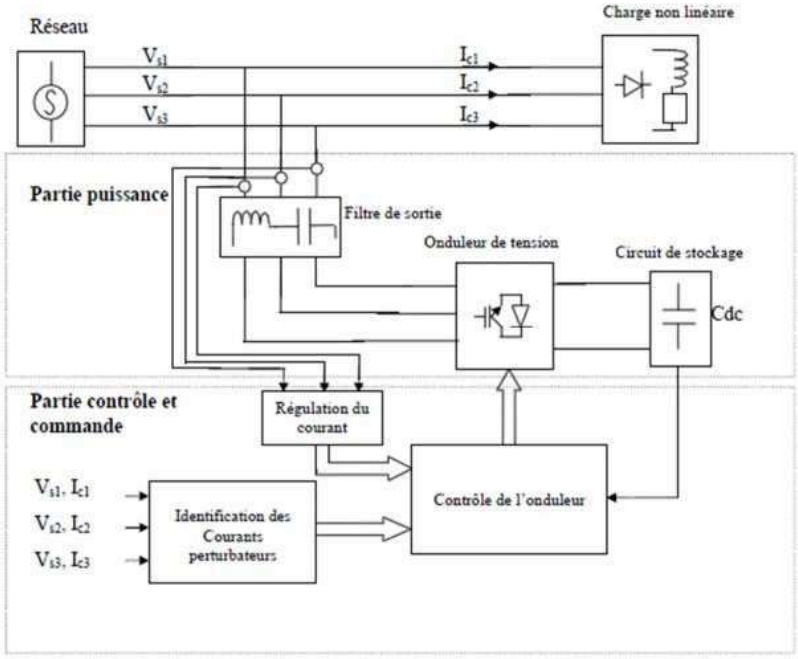


Figure (IV.1) structure générale de FAP []

IV.2.1.1 Partie puissance

Dans la partie puissance de filtre on trouve les trois blocks ou élément cité précédemment dont :

- L'onduleur : est l'élément principale il est constituer des IGBT avec des diodes a tète bèche, deux tache majeur lui ont été confié, l'élimination des harmonique et la compensation de l'énergie réactive, a fin de réaliser ces objectifs celui-ci doit être capable de fournir une tension avec un contenue harmonique prédéfinie [16][18]
- Un circuit de stockage : qui peut être modélisé par une source de tension continue, ou par un condensateur qui joue aussi le rôle d'une source de tension continue
- Un filtre de sortie : est un filtre de premier ordre qui est en réalité une inductance, utiliser pour relier la sortie de l'onduleur au réseau sont objectif est de générer les courants harmonique a partir des tensions entre la sortie de pont onduleur et le réseau

IV.2.1.2 Partie contrôle commande

La partie commande est constituer de

- Méthode d'identification des courants perturbateurs
- La régulation de courant injecte sur le réseau a partir de l'onduleur de tension

Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence, trois techniques de commande d'onduleur peuvent être utilisées

- La commande par hystérésis.
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).
- La commande par MLI vectorielle.

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants a la sortie du filtre, a fin qu'ils suivent leurs référence, le principe est basé sur la comparaison entre les courants du sortie du filtre et leur référence identifier a partir des différentes méthodes d'identification [19][20]

IV.2.2 Méthode d'identification des courants harmonique

Les méthodes ou technique utiliser pour l'identification des courants harmonique sont classée en deux grande famille, (fréquentielles ou temporelle)

La première est dans le domaine fréquentielle, elle est basé sur la transformée de fourrier pour extraire les harmonique du courant, cette méthode est adapter ou le contenu harmonique change lentement, car cette algorithme nécessite beaucoup de calcule puisqu'il traite individuellement les harmonique, et de ne choisir a compenser que les plus prépondérante [16][17][19]

La deuxième approche repose sur la comparaison instantanée des grandeurs de compensation harmonique de référence, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active de courant total

IV.2.2.1 Méthode des puissances instantanées

On a choisi cette méthodes parce qu'elle est simple a mètre en ouvre et elle est d'une grande souplesse, elle consiste a éliminer la composante continue des puissances active et réactives, pour faire cela cette méthodes exploite la transformer de Concordia pour obtenir des puissances active et réactive [16][17][18]

On a $[V_s]$ et $[i_s]$ sont respectivement les tensions simples du point de raccordement et les courant de charge

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \text{ et } [i_c] = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{(IV .1)}$$

La représentation de ces deux vecteurs dans le repère (α,β) est réalisée avec la transformation de concordia comme suit

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

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

La puissance instantanée p(t) est donnée par la relation suivante

$$p(t) = v_{s1} i_{c1} + v_{s2} i_{c2} + v_{s3} i_{c3} = p(t) + P_o(t) \quad \text{(IV .4)}$$

$$p(t) = v_{s\alpha} i_{c\alpha} + v_{s\beta} i_{s\beta} \quad \text{(IV .5)}$$

$$p_o(t) = v_{so} i_{so} \quad \text{(IV .6)}$$

Avec p(t) la puissance instantanée réelle

Et : po(t) la puissance instantanée homopolaire

L'avantage de la transformation (α,β,o) est la séparation des composante homopolaire du systèmes triphasé du courant ou de tension

De la même manière la puissance imaginaire (réactive) peut s'exprimer comme suit

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}}(v_{s1} - v_{s2}) i_{c3} + (v_{s2} - v_{s3}) i_{c1} + (v_{s3} - v_{s1}) i_{c2} = v_{s\alpha} i_{c\beta} - v_{s\beta} i_{c\alpha} \quad \text{(IV .7)}$$

Donc a partir de ces équations on peut déduire le model matriciel suivant

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(IV .8)}$$

On peut décomposer les puissances instantanée p et q en deux composantes, les composantes continues liées au fondamental ($\bar{p}$ et $\bar{q}$) et les composante alternative liées aux harmoniques ($\tilde{p}\ et\ \tilde{q}$) comme suit [14]

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

De la relation (IV.8) donnant les puissances réelle et imaginaire instantanée découle l'expression suivant pour les courants [14]

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \qquad \text{(IV .10)}$$

Avec $\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$

On considérants les équations nous pouvons séparer le courant dans le repère (αβ) en trois composante active, réactive et la fréquence fondamentale et les harmonique ceci conduit a

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{p} \\ o \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} o \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \qquad \text{(IV .11)}$$

Pour compenser la puissance ainsi que les courants harmoniques générer 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 références sont calculés comme suit [14]

$$\begin{bmatrix} i_{ref\,\alpha} \\ i_{ref\,\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \qquad \text{(IV .12)}$$

Les courants perturbateurs dans le repère triphasé qui représente les courants identifier (dite courant de référence) sont obtenue a partir du system diphasé des courant I_α et I_β , on utilisant la transformation inverse de concordia , ces courants seront injectés dans le réseau en opposition de phase pour compenser et éliminer les harmoniques [21]

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

La figure qui suit montre le schéma général d'indentification des courants par la méthode des puissances instantanée

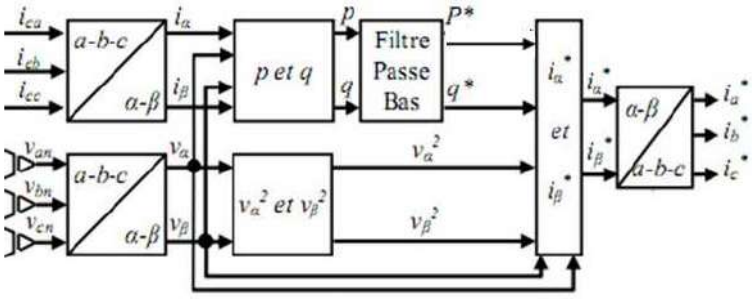


Figure (IV.2) : schéma générale de l'algorithme p-q [21]

IV.3 Modélisation de Filtre active parallèle

IV.3.1 Charge non linéaire

La source de tension est constitué par un réseau d'alimentation qui sur une charge qui est représenter par un redresseur a thyristors qui alimente a son tour une charge (RL) , une inductance Lf est connecté a l'entrée de redresseur pour limiter les gradient di/dt due a l'amorçage des interrupteurs [17][18][19]

Le réseau d'alimentation est modéliser par trois sources de tension sinusoïdales équilibrés en série avec une inductance Ls et une résistance Rs

IV.3.2 L'élément de stockage

Pour les petites et moyennes tensions l'élément de stockage le plus adaptés est un condensateur placé dans le coté continue de l'onduleur qui a deux taches

- En régime permanent il maintient la tension de bus continue constante avec une légère oscillation
- Il sert comme élément de stockages pour compenser les pics due aux différences des puissances entres la charge et la source en régime transitoire

Il existe plusieurs approches pour calculer ou estimer la valeur de condensateur, parmi ces approches celle qui est basé sur le rôle de condensateur qui est d'absorber ou de produire la puissance demandé par la charge lors de régime transitoire, donc la valeur de la capacité peut être calculer par la relation suivante [13]

$$C = \frac{2.p_{max}.20.10^{-1}}{V_{dc}^2(1-K^2)} \qquad \text{(IV .14)}$$

Ou $$k = \frac{v_{dc\,ref}}{v_{dv}} = 10\%$$

IV.3.3Filtre de sortie

La commutation des interrupteurs formant l'onduleur va induire des harmonique a haute fréquence, donc pour absorber ces harmonique on va placer a la sortie de l'onduleur une inductance Lfa

La valeur de l'inductance doit être bornée en valeur maximale pour produire la quantité nécessaire de courant harmonique en amplitude et en fréquence , pour cela pour une fréquence de commutation donnée sur la base de contrainte que la pente minimale du courant de filtre

doit être inferieure a la pente du signal triangulaire de la porteuse qui définit la fréquence de commutation pour assurer l'intersection entre la porteuse et le signal de l'erreur de courant
Ce filtre est l'élément essentiel de raccordement, il assure le Transfer de l'énergie entre le point commun de connexion et l'onduleur, sa relation est donnée par : [15]

$$L_{fa} = \frac{V_s + 0.5V_{dc}}{4.A.f_m} \quad \text{(IV .15)}$$

Ou A : est l'amplitude de signal triangulaire

f_m : la fréquence de la porteuse

Pour une valeur de A= 15% on trouve que la présente inductance est limité entre

$0.9mH<L_{fa}<1.7mH$

IV.3.4 Dimensionnement de régulateur PI

Le régulateur PI a pour but de réguler la tension aux borne de l'élément de stockage (condensateur), pour la maintenir a une valeur précise et réduire les fluctuation de bus continue , sa fonction de Transfer est retenue comme correcteur pour la boucle externe [15]

Les paramètres Ki et Kp peuvent être calculé par les relations suivantes

$$K_p = \frac{2.\varepsilon.K_i}{\omega_o} \quad \text{(IV .16)}$$

$$K_i = \frac{\omega_o.V_{dc\,ref}.C_{dc}}{V_s^2} \quad \text{(IV .17)}$$

Ou $\omega_o=2\pi f_o$

Avec f_o : fréquence de coupure de filtre

ε : est le dépacement

IV.4 Simulation et Résultats

La simulation est toujours réaliser avec le logiciel MATLAB/Simulink
Cette simulation est diviser en plusieurs partie dans chaque partie on change un paramètre ou bien introduire une nouvelle structure ou technologie dans un élément ou composant constituant le FAP et a chaque fois en relève les différents paramètres caractérisant notre système , puis les comparer dans un tableau général qui résume les différents partie simulé

Le system en question est constituer de trois sources de tension triphasé qui modélise le réseau d'alimentation, les sources sont connecté avec une inductance Ls et une résistance Rs qui modélise l'impédance de court circuit, l'ensemble alimente une charge non linéaire constituer d'un redresseur triphasé a thyristor qui débit sur une charge RL, une inductance Lf

est connecté a l'entre de redresseur qui modélise l'impédance de la ligne pour limiter les variations de courant

Le tableau suivant donne les valeurs des différents paramètres de simulation mis en ouvre dans notre système

Paramètre		valeur numérique
Réseau d'alimentation	Tension Vs(V)	230
	Fréquence f(Hz)	50
	Resistance série Rs(Ohm)	0.25
	Inductance série Ls (µH)	19.4
Change linéaire en aval de redresseur	Resistance de la charge R (Ohm)	6.5
	Inductance de la charge L (mH)	20
Filtre de raccordement	Inductance Lfa (mH)	1.5
Filtre en amont de redresseur	Inductance Lf (mH)	1.5
Source de tension de l'onduleur Vdc (V)		840
Temps de simulation t (s)		0.3

Tableau (IV.1) : les paramètres de système de FAP

IV.4.1 Résultat de Simulation sans Filtre

Dans cette partie on va simuler le comportement d'une charge non linéaire connecté directement au réseau avec les paramètres cité dans le tableau (IV.1)

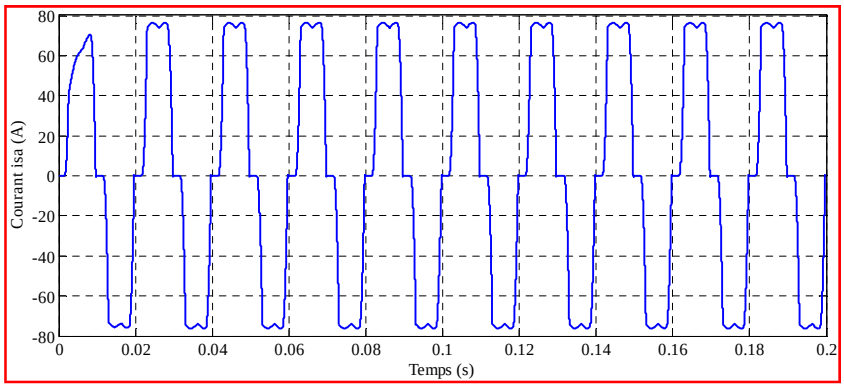


Figure (IV.3) : montre le courant de la charge polluante en fonction de temps

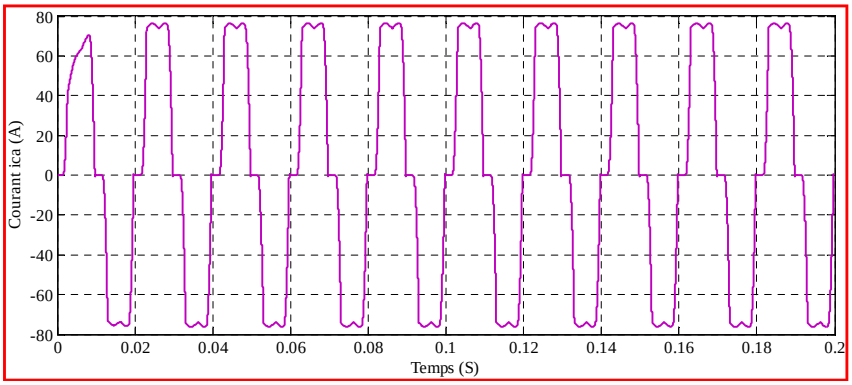


Figure (IV.4) le courant d'une phase la source triphasé en fonction de temps

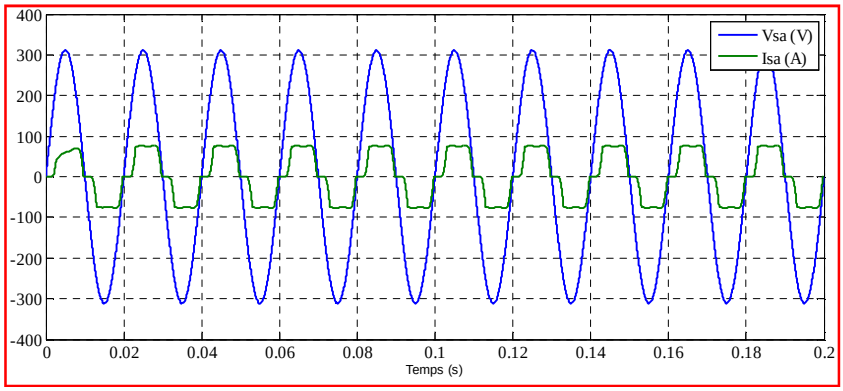


Figure (IV.5) : courant et tension d'une phase de la source triphasée en fonction de temps

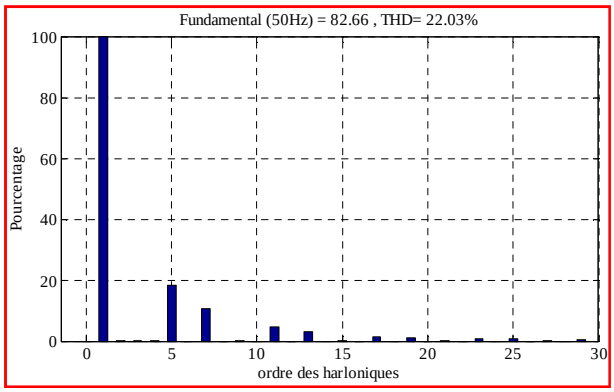


Figure (IV.6) : le THD d'une phase de la source triphasé sans filtre

On distingue d'après ces figures que les courbes de courant de la charge et de la source sont déformées (signal non sinusoïdale), et qu'il existe un déphasage significative entre le courant et la tension de la source, on constate alors que c'est la charge qui impose le courant a la source

Et d'après la figure (IV.6) on voit claire que le taux de THD (22.03%) est hors norme (<5%) , ce qui nécessite d'introduire un filtre active parallèle dans notre système

IV.4.2 Simulation et résultat Avec un FAP

Cette simulation est diviser en plusieurs partie , on change a chaque fois un paramètre ou une structure de notre système , comme de remplacer la source de tension par un bus continue modéliser par un condensateur d'une valeur (C=1351µF) calculer par la relation (IV.1) , ou bien remplacer l'onduleur a deux niveau par un onduleur a cinq niveau a structure diode flottante présente dans le chapitre 2 , et pour chaque changement on remplace l'algorithme PQ par un régulateur basé sur les réseau de neurone , on aura donc huit cas de simulation

IV.4.2.1 Pour un Onduleur a deux niveaux

a) Avec source de tension

Ces résultats on été donné pour un onduleur a deux niveau alimenté par une source continue V=840 V,

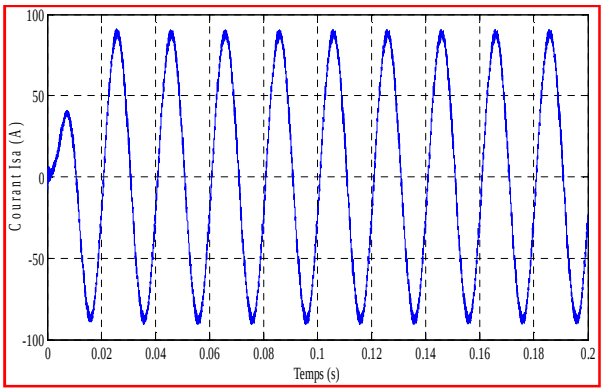


Figure (IV.7) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ

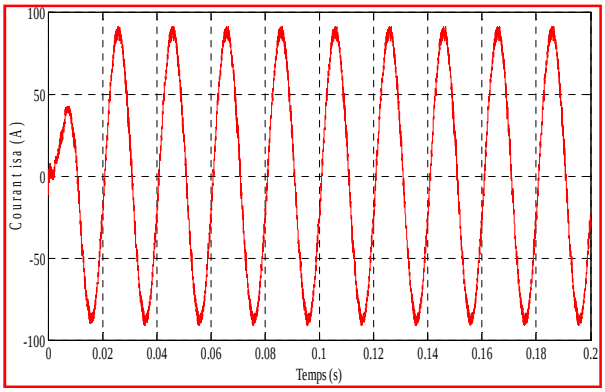


Figure (IV.8) : courbe du courant de source d'une seule phase pour le régulateur neurone

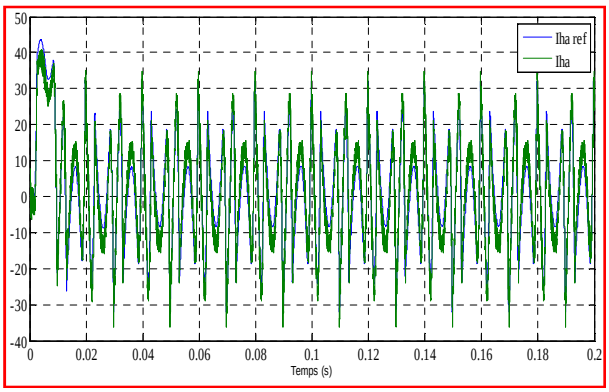


Figure (IV.9) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme PQ

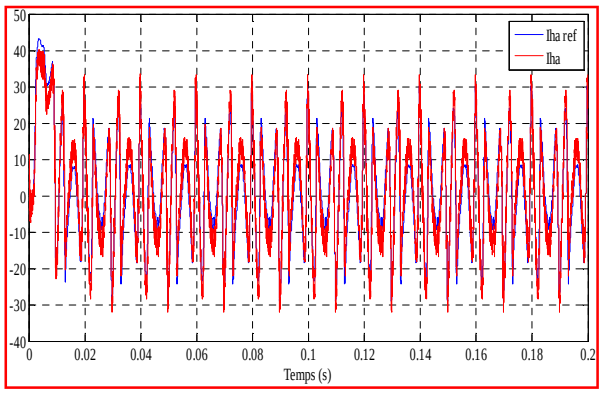


Figure (IV.10) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone

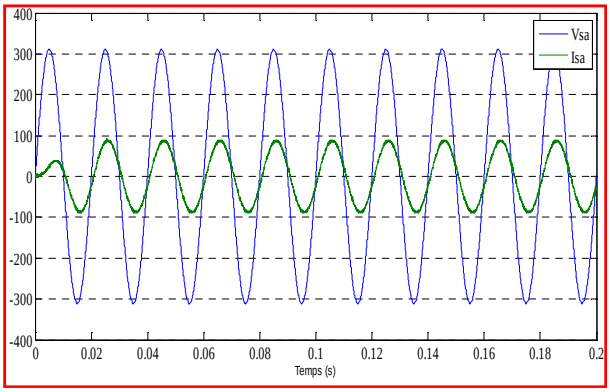


Figure (IV.11) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ

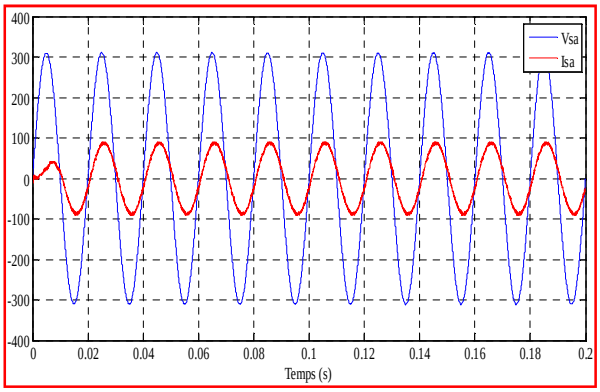


Figure (IV.12) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec le régulateur neurone

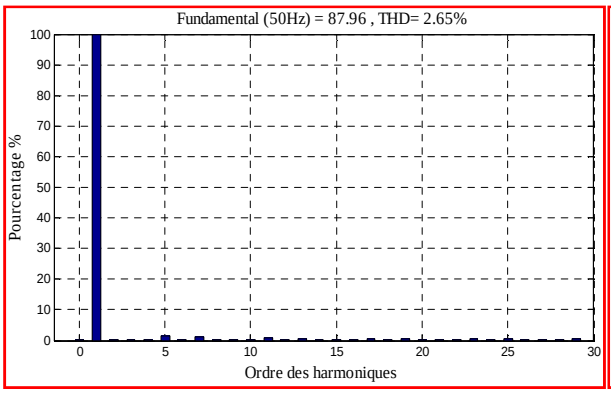


Figure (IV.13) : Le THD avec l'algorithme PQ

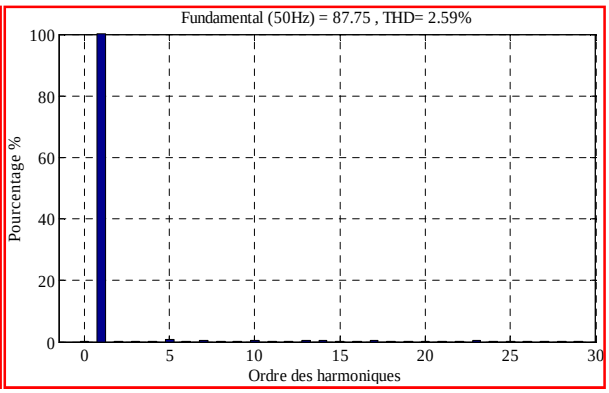


Figure (IV.14) : Le THD avec le régulateur neurone

D'après les figures précédentes on peut tirer les observations suivantes **:**

- L'allure de courant de source est devenue sinusoïdal pour les deux systèmes d'identifications (algorithme PQ et aussi pour le régulateur neurone)
- Le courant harmonique identifier ou mesuré suit le courant harmonique de référence pour les deux systèmes de régulations
- La tension et le courant de source sont en phase dans les deux cas de régulations

b) Avec un Bus continue

On remplace la source de tension par un condensateur et on va réguler l'erreur entre la tension au borne de condensateur et une valeur de tension de référence par un régulateur PI

On donne C=1351µF et K_p=0.0033, K_i =0.1789, calculer respectivement par les relations (IV.14), (IV.16) et (IV.17)

Les résultats sont les suivants :

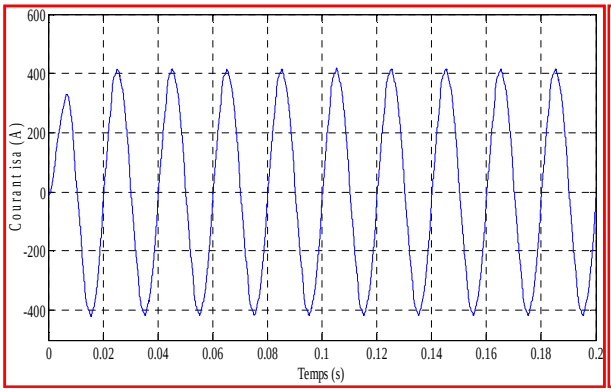


Figure (IV.15) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ

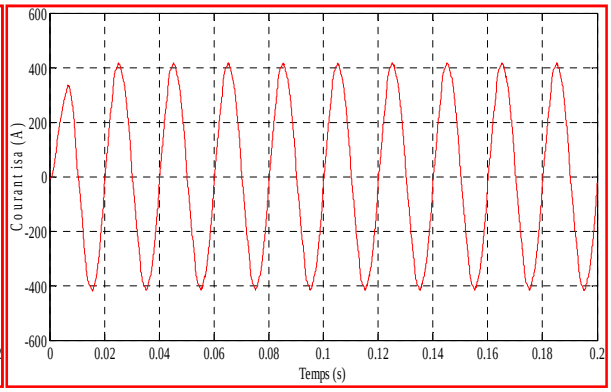


Figure (IV.16) : courbe du courant de source d'une seule phase avec le régulateur neurone

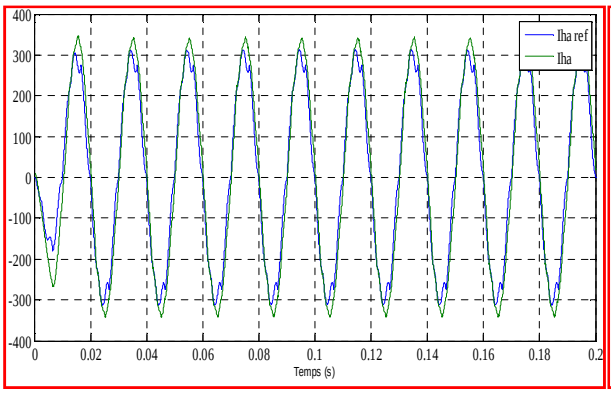


Figure (IV.17) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme PQ

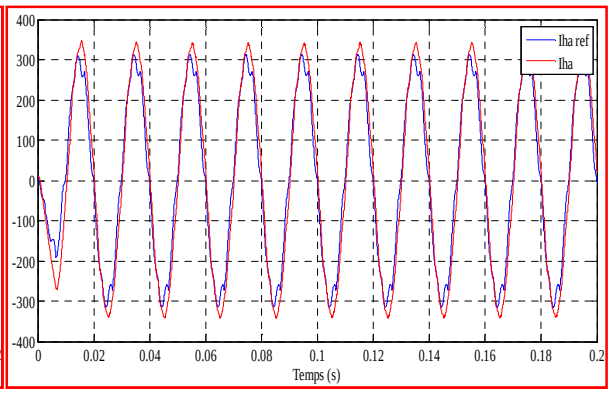


Figure (IV.18) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone

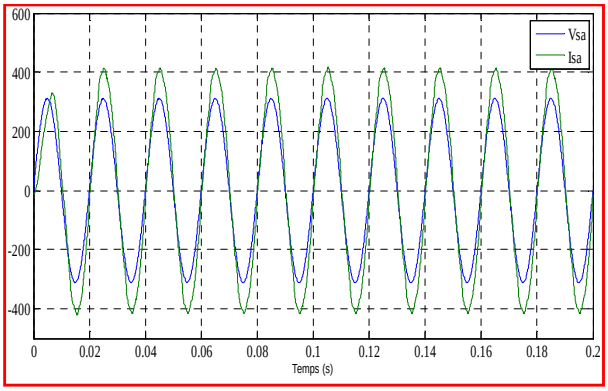


Figure (IV.19) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ

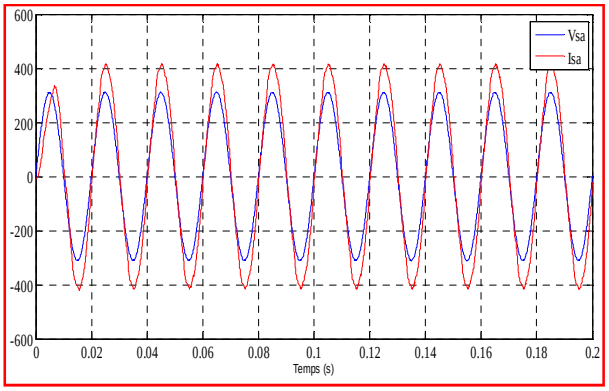


Figure (IV.20) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec Le regulateur neurone

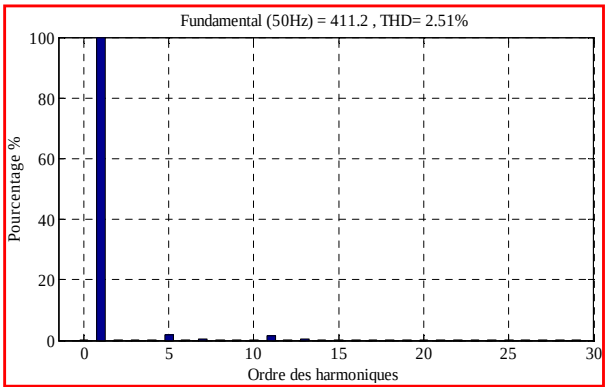


Figure (IV.21) : Le THD avec l'algorithme PQ

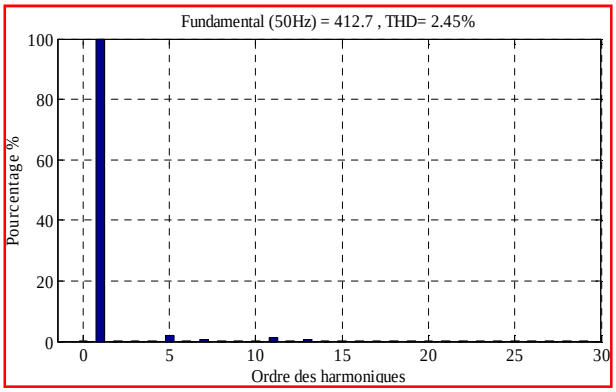


Figure (IV.22) : Le THD avec le régulateur neurone

D'après les figures précédentes de (Figure IV.15 a Figure IV.22) on constate que la source de tension peut être bien remplacer par le bus continue modéliser par un condensateur grâce aux améliorations qui ont apporté pour les différentes caractéristiques vues dans les résultats précédents (figure IV.7 a figure IV.14) notamment pour le THD , on remarque aussi que le régulateur neurone a très bien imité l'algorithme PQ avec une amélioration aussi pour le THD

IV.4.2.2Pour un Onduleur 5 niveaux

Dans cette partie on va remplacer l'onduleur deux niveau par un autres ayant cinq niveau de tension a structure diode flottante, et on refait les mêmes étapes que pour le deux niveaux, les résultats obtenue sont comme suit

a) Avec source de tension

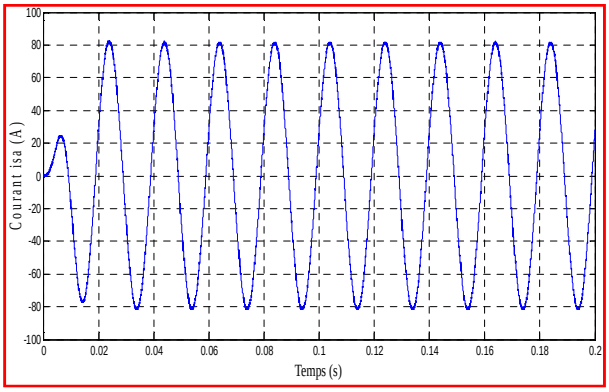


Figure (IV.23) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ

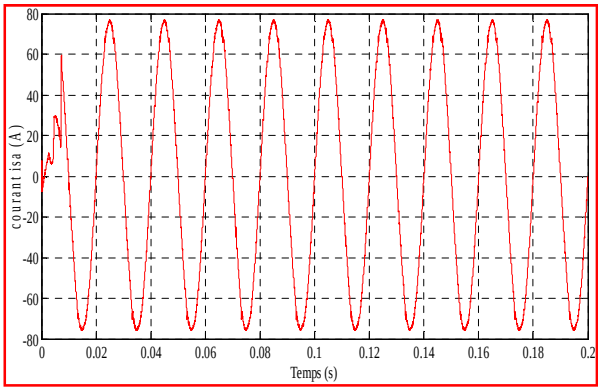


Figure (IV.24) : courbe du courant de source d'une seule phase avec le régulateur neurone

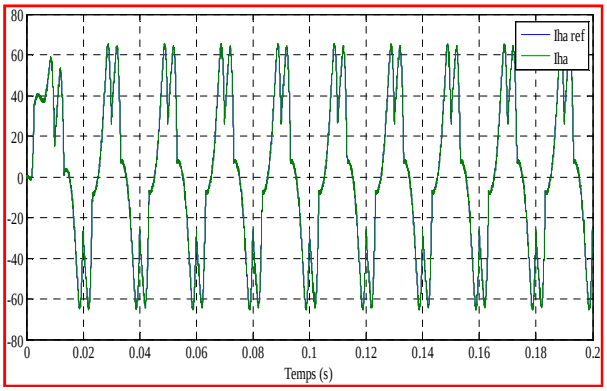


Figure (IV.25) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme

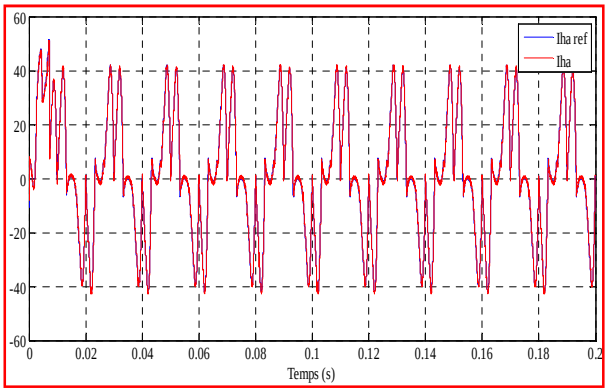


Figure (IV.26) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone

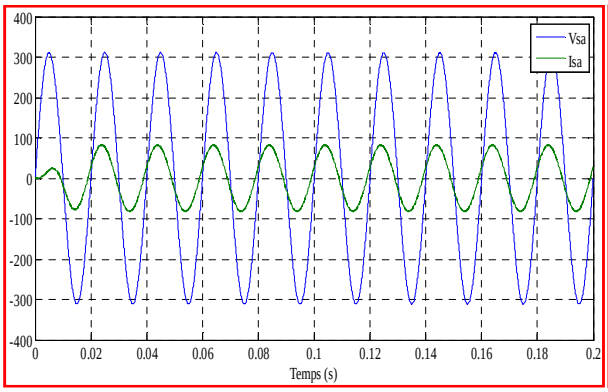


Figure (IV.27) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ

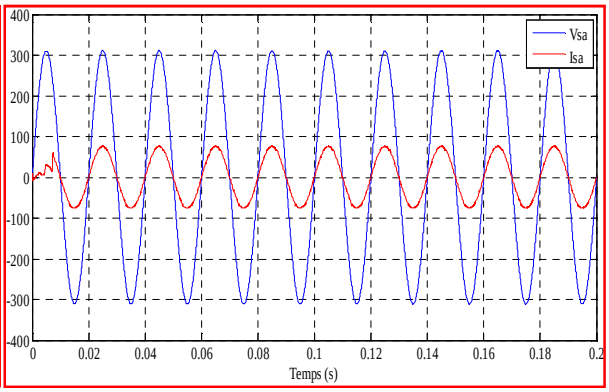


Figure (IV.28) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec le régulateur neurone

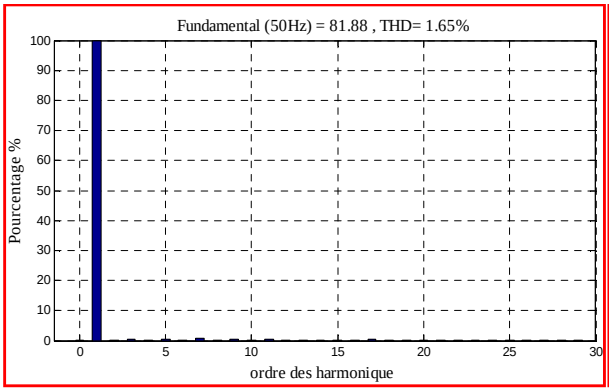


Figure (IV.29) : Le THD avec l'algorithme PQ

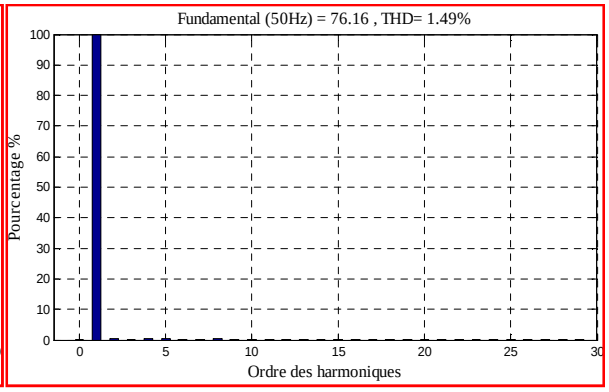


Figure (IV.30) : Le THD avec le régulateur neurone

D'après les figures précédentes (de figure IV.23 a figure IV.30) on constate que l'onduleur cinq niveaux apporte une bonne amélioration pour les caractéristiques de notre systèmes pour le THD ainsi pour le déphasage entre le courant et la tension de la source qui diminue de plus en plus

b) Avec un bus continue

Remplaçons toujours la source de tension par un bus continue (Condensateur), les résultats sont les suivants

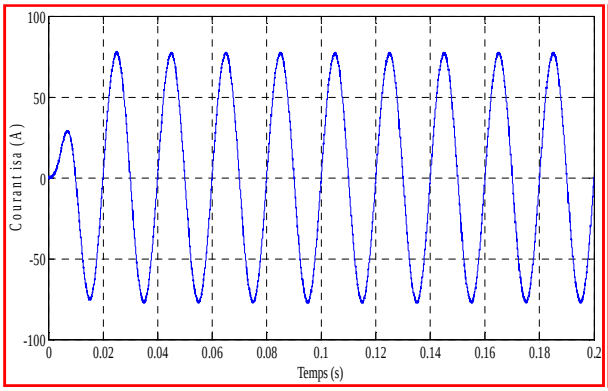


Figure (IV.31) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ

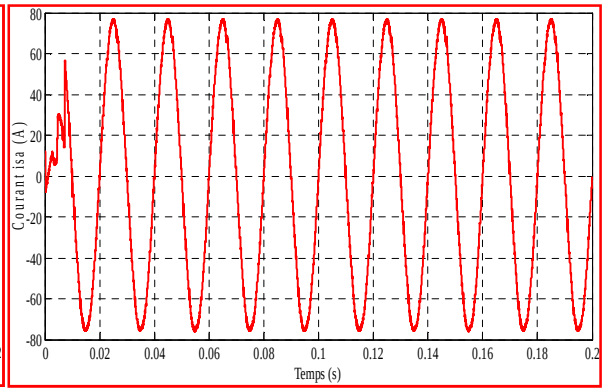


Figure (IV.32) : courbe du courant de source d'une seule phase avec l'algorithme PQ

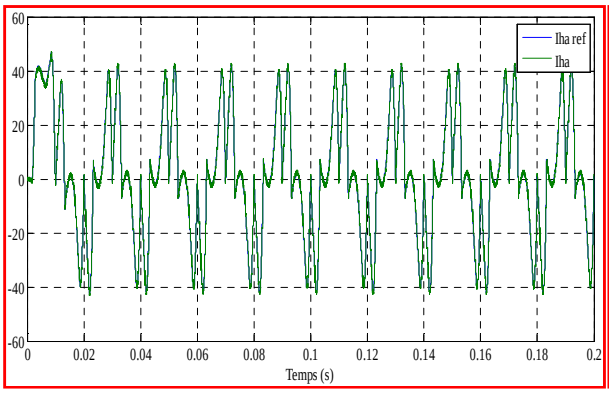


Figure (IV.33) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec l'algorithme PQ

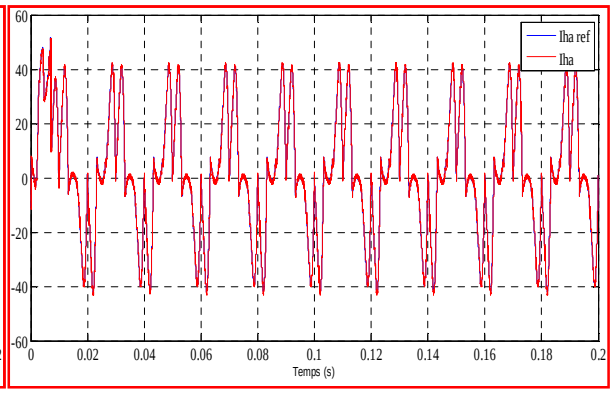


Figure (IV.34) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps pour une phase avec le régulateur neurone

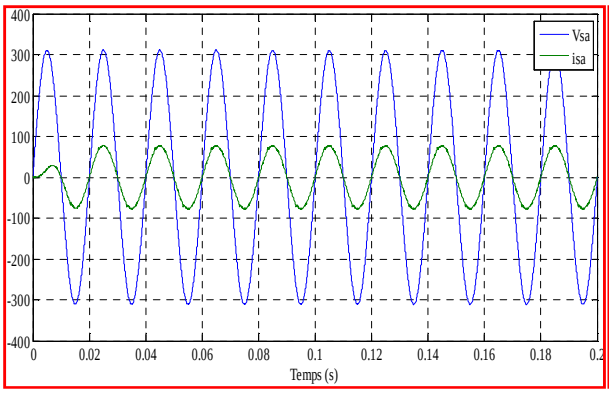


Figure (IV.35) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec l'algorithme PQ

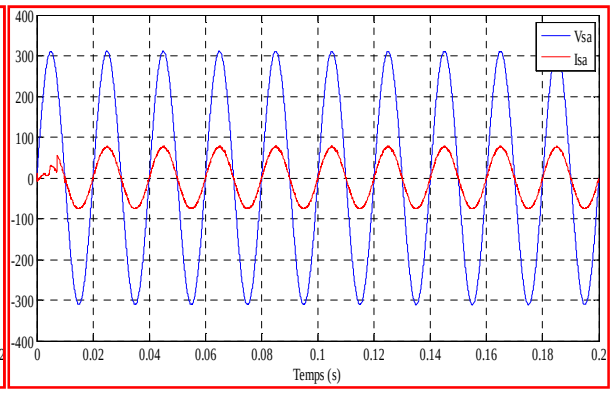


Figure (IV.36) : courbe de courant et tension de source d'une seule phase en fonction de temps avec le régulateur neurone

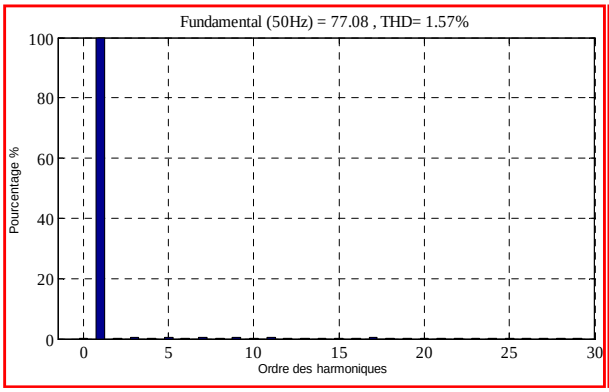


Figure (IV.37) : Le THD avec l'algorithme PQ

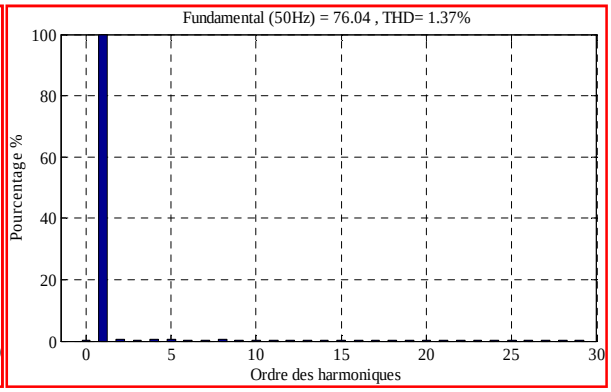


Figure (IV.38) : Le THD avec le régulateur neurone

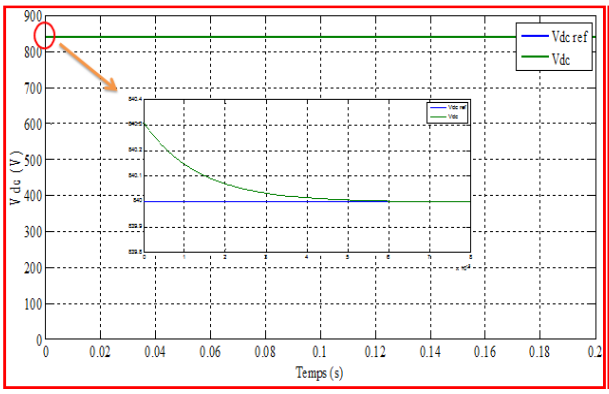


Figure (IV.39) : courbe de la tension au borne de condensateur et la tension de référence en fonction de temps avec l'algorithme PQ

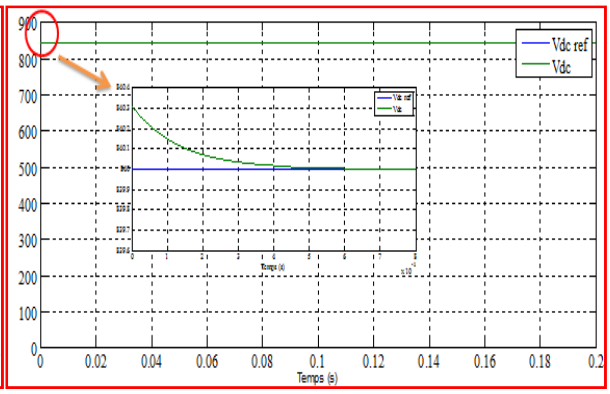


Figure (IV.40) : courbe de la tension au borne de condensateur et la tension de référence en fonction de temps avec le régulateur neurone

D'après ces figure on distingue que notre system est beaucoup améliorer au niveau de déphasage entre la tension et courant de source et aussi le THD, on constate aussi que le régulateur PI qui maintient la tension au borne de condensateur a une valeur stable a très bien réguler cette tension soit avec l'algorithme PQ ou bien avec le régulateur neurone

Le tableau suivant résume d'une façon générale les huit cas de simulations :

Tableau (IV, 2) : Résultats des Simulations de FAP

Onduleur 02 Niveaux			φ(°)	Onduleur 05 Niveaux			φ(°)
Source de tension	Algorithme PQ	2.65 %	16.2	Source de tension	Algorithme PQ	1.65 %	18
	Réseau de neurone	2.59 %	14.4		Réseau de neurone	1.49 %	0
Bus cc (Condensateur)	Algorithme PQ	2.51 %	2.88	Bus cc (condensateur)	Algorithme PQ	1.57 %	0.18
	Réseau de neurone	2.45 %	3.6		Réseau de neurone	1.37 %	0

Ou : φ est le déphasage entre le courant et la tension de la source

D'après le tableau (IV.2), on voit clairement que le filtre a cinq niveau utilisant le condensateur comme un bus continue avec un régulateur neurone est le mieux adapter grâce aux performance qu'il apporte au niveau de taux de THD ainsi pour le déphasage entre le courant et la tension de la source , donc pour cela on utilise ce filtre pour le reste de notre étude

Pour visualiser le phénomène de filtrage on va placer au point de raccordement de filtre un breaker, ce dispositif sert d'un interrupteur muni d'une minuterie on peut le régler pour que le filtre soit actif ou non , pour notre cas le filtre sera en fonctionne après 0.1 s donc la premier partie est sans filtre et dés la seconde (0.1s) notre filtre commence a fonctionner , les résultats sont dans la figure sui suit

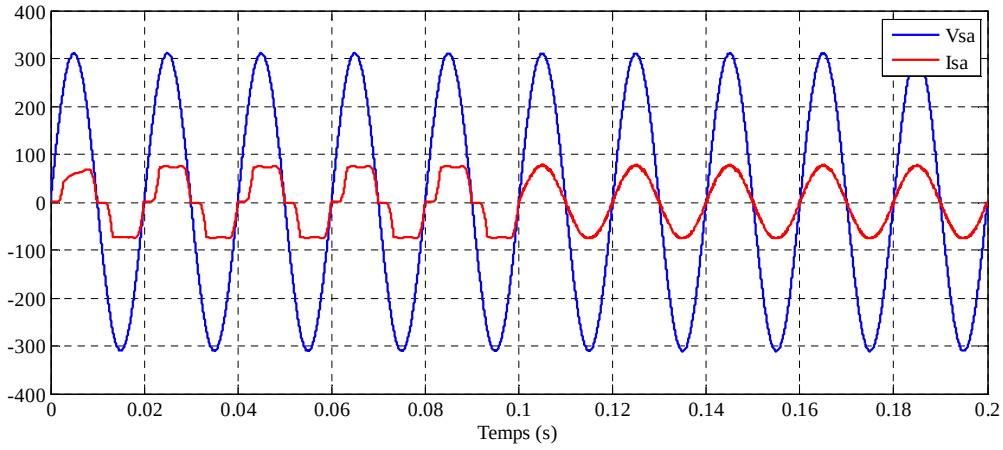


Figure (IV.41) : courant et tension de source avent et après le filtrage

Comme on voit ici que avant le fonctionnement de filtre t<0.1s la forme de courant de source est déformer (signal non sinusoïdal) et des que le breaker passe a l'état passant t>0.1 s le filtre sera mis en fonction et le courant de source devient sinusoïdal et en phase avec la tension de source

IV.5 Filtrage de Système de conversion éolien raccordé au réseau

Dans cette partie on va relier au point de raccordement de l'éolienne un filtre active parallèle a fin de filtrer les harmonique et limiter leur propagations tout au long des lignes

Pour distinguer les performances de ce filtre on doit tout d'abord présenter le même système sans filtre on relève les caractéristiques nécessaire notamment la forme de la courbe de courant de source aussi le taux de THD, puis on va introduire le FAP étudier auparavant et voir les performances qui apporte ce dernier a notre système

La figure qui suit illustre la structure de notre système de conversion éolien sans filtre

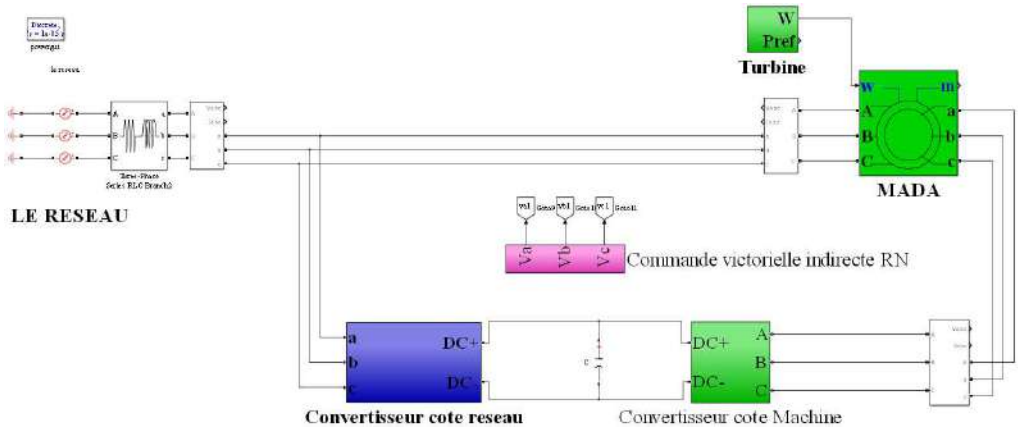


Figure (IV.42) : Système de conversion éolien sans filtrage connecté au réseau

IV.5.1 Résultats de simulation

La simulation est réaliser par le logiciel MATLAB/Simulink, on présente dans ce qui suit les caractéristique nécessaire du système étudier

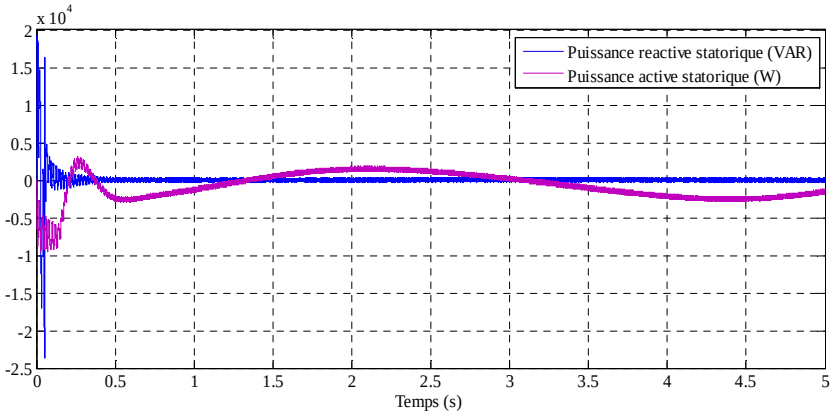


Figure (IV.43) : courbe de puissance active et réactive statorique en fonction de temps

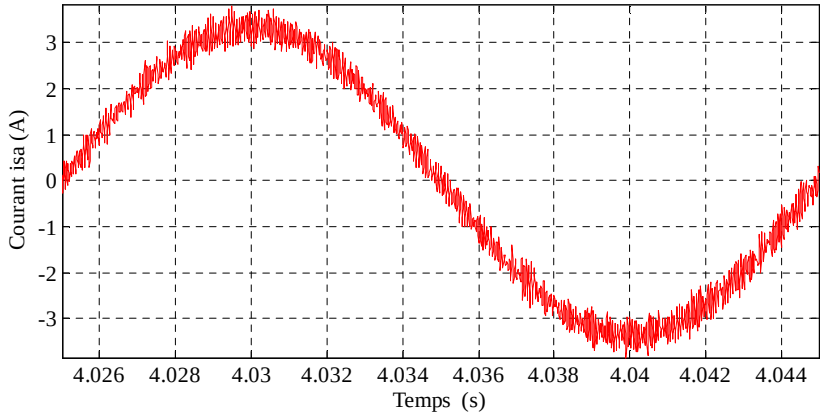


Figure (IV.44) : Courbe de courant de source d'une seule phase sans filtrage

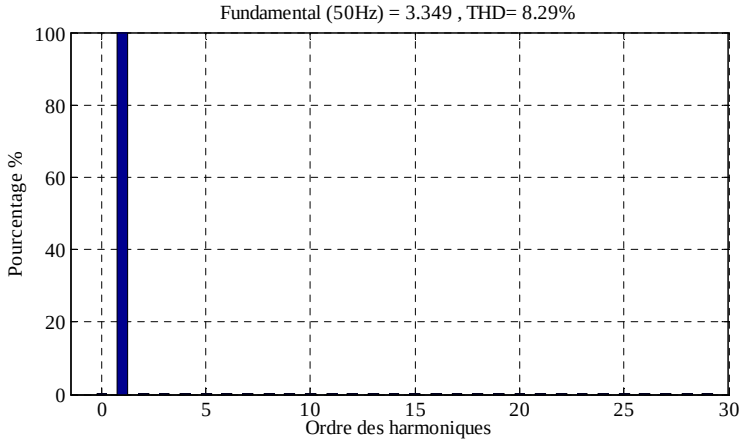


Figure (IV.45) : Le THD d'une seule phase de courant de source dans filtrage

La figure (IV.43) montre la puissance active et réactive statorique qui est relie au réseau , on constate que la puissance active statorique varie selon la variation de la vitesse de la turbine qu'on a pris comme référence tandis que la puissance réactive reste nulle pour garder un facteur de puissance unitaire

La figure (IV.44) montre le courant de la source d'une seul phase, on voit bien que la courbe de courant prend une forme sinusoïdal avec des fluctuante qui sert de perturbation dans le réseau ce qui produit des harmonique comme il est indiquer dans la figure (IV.45), le taux des harmonique alors est de (8%) donc ce système nécessite un filtrage

IV.6 Système de conversion éolien avec filtrage

Apres avoir simulé le system sans filtre et présenter les caractéristiques nécessaires on va introduire le FAP, puis on distingue les performances qui va apporter a notre système

La figure qui suit montre l'emplacement de FAP dans notre système

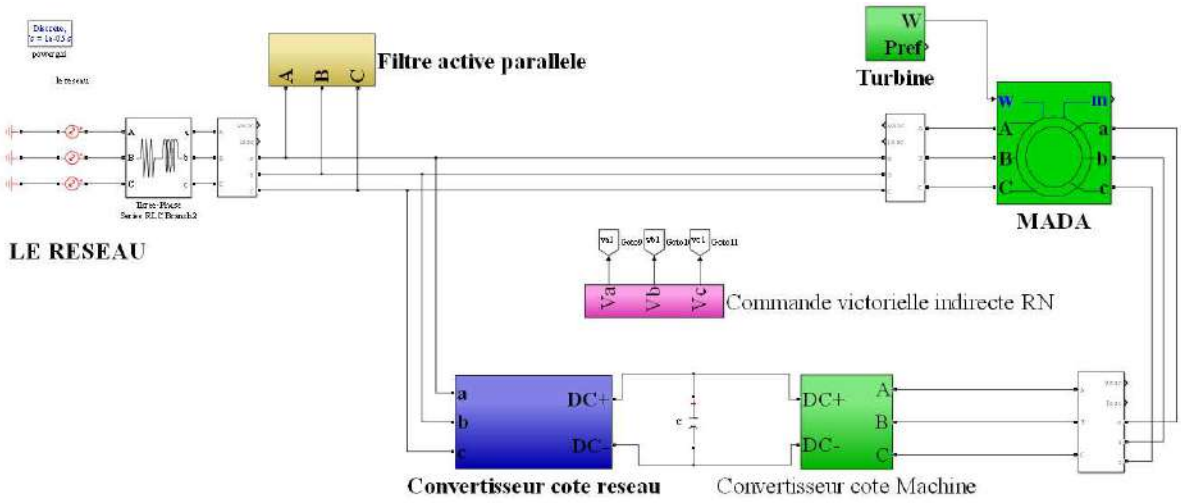


Figure (IV.46) : structure de système de conversion éolien avec FAP

IV.6.1 Résultats de simulation

La simulation ce fait toujours par le logiciel MATLAB/Simulink

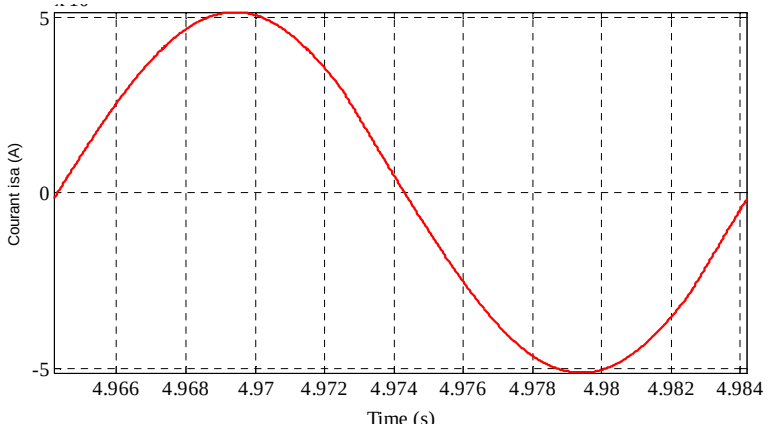


Figure (IV.47) : courbe de courant de source avec FAP

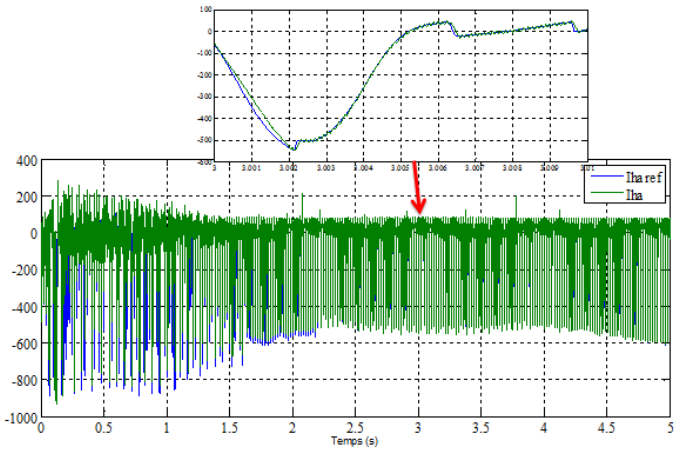


Figure (IV.48) : courbe du courant harmonique identifié et courant harmonique de référence en fonction de temps avec un FAP

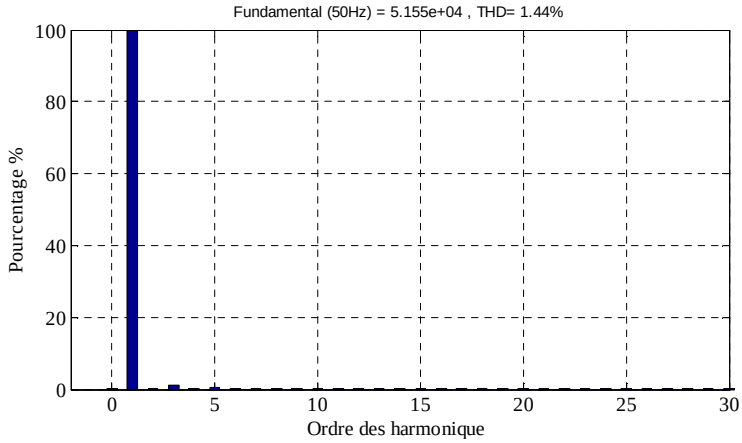


Figure (IV.49) : Taux de THD du courant de source avec FAP

D'après la figure (IV.47) on distingue que le courant de source prend une forme sinusoïdal plus lisse que celle avant le filtrage, son taux de THD diminue aussi comme il est indiquer dans la figure (IV.49) pour atteindre une valeur de (1.44%) qui est acceptable

On voit aussi que les courant harmonique mesure suit parfaitement les courant harmonique de référence comme il est montrer dans la figure (IV.48)

D'après ces résultats on conclue que le Filtre active parallèle est indispensable pour avoir une bonne énergie électrique en termes de qualité

Les convertisseurs multi niveau et le régulateur neural jouent un rôle très important dans la performance de notre système et cela grâce aux bons résultats obtenue

IV.7 Conclusion

Ce chapitre est consacre sur l'étude des différentes méthode qui permet d'améliorer la qualité d'énergie du réseau qui repose essentiellement sur l'étude d'un filtre active parallèle , on a vu donc la méthode d'identification des harmonique avec l'algorithme PQ et aussi remplacer cette méthode par un régulateur neural qui est plus performant notamment avec l'utilisation d'un onduleur a cinq niveaux qui a apporter de meilleur performance par rapport a l'onduleur deux niveaux

La mise en ouvre d'un bus continue modéliser par un condensateur et un onduleur cinq niveau avec le régulateur neural dans un filtre active parallèle rend ce dernier plus performant pour l'élimination des harmonique due aux charges polluantes, et d'avoir une meilleur énergie avec un taux de THD le plus faible possible

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but de notre travail est de réaliser un system éolien avec une bonne qualité d'énergie a injecter dans le réseau selon les normes, ce travail est réaliser en plusieurs étapes pour arriver a un résultat final

En premier lieu on a alimenté la MADA seul avec des différentes vitesses et grandeur électrique au niveau de rotor et on a constater que sont comportement est similaire a celui de modèle réelle utiliser dans les éoliennes, puis on a introduit un onduleur a cinq niveau et on a vu sont importance pour une valeur spécifique de l'indice de modulation

On a vu dans une second approche que le comportement de la MADA peut entre ramener a celui de la machine a courant continue a excitation indépendante grâce a la commande vectorielle, soit avec des régulateurs classique ou bien par des régulateur neural

On a vu dans le quatrième chapitre l'intérêt de filtre active parallèle avec les différents élément qui le constitue ainsi les déférentes méthodes d'indentification des courant perturbateurs , on a vue que l'utilisation d'un onduleur a cinq niveau ayant un bus continue a ces bornes et avec un régulateur neural pour l'identification des courant perturbateur est la configuration idéale grâce a ces performances avec un faible taux de THD et un déphasage nul entre le courant et la tension de la source , cette configuration nous a permet d'avoir des meilleur résultat lors de sont intégration dans le système de production éolien en éliminant les courant perturbateur générer par les charges non linéaire

Ces résultats obtenue lors de la simulation de notre systèmes peuvent être améliorer en introduisant de nouvelle technique de commande notamment ceux basé sur l'intelligence artificielle , ou peut néanmoins exploiter ces résultats pour contrôler les aérogénérateur destine a la production électrique en introduisant ces commande dans DSPACE ou bien FPGA pour rendre notre système de production plus performant et dynamique

ANNEXE A

ANNEXE A :

Caractéristiques de la MADA :

La machine asynchrone a double alimentation utilisé dans notre simulation porte les caractéristiques suivantes

Caractéristique	Valeur
Puissance nominale	7500 W
Tension nominal	620 V
Fréquence	50 HZ
Resistance statorique	1.2 Ohm
Resistance rotorique	1.8 Ohm
Inductance rotorique	0.1554 H
Inductance statorique	0.1568 H
Inductance mutuelle	0.15 H

Tableau A.1 caractéristiques de la MADA

Bibliographie

[1] Arnaud BOYETTE « Contrôle-commande d'un aérogénérateur asynchrone a double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » thèse de doctorat de l'universite Henri Poincaré, Nancy I 2006-2007

[2] Madjid SI BRAHIM « étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne a base de la machine asynchrone » thèse docteur en 3eme Cycle en électrotechnique UMMTO 2015

[3] LAUHA FRIED « global wind report 2016 » GWEC 2017

[4] S.M. Boudia Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie universite de Tlemcen 2013

[5] Sejir KHOJET ELKHIL « commande vectorielle d'une machine asynchrone a double alimentation » Ingénieur ENIT école doctorale GEET Tunis 2006

[6] Abderrahim TELLI « étude et commande d'une éolienne a vitesse variable intégrée au réseau MT » magister en électrotechnique 2012

[7] Salma EL AIMANI« modélisation de différentes technologies d'éoliennes intègres dans un réseau de moyenne tension » doctorat génie électrique, universite des sciences et technologie de Lille 2004

[8] Cherif BENNOUR « Simulation de la commande vectorielle par régulateur a mode glissant d'une chaine éolienne a base d'une machine asynchrone a double alimentation » magister en électrotechnique université Mohammed khider Biskra 2012

[9] Lotfi BAGHLI « Contribution a la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseau de neurones et des algorithmes génétiques » doctorat génie électrique université Henri Poincaré Nancy I 1999

[10] Azzouz TAMAARAT« Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne a base d'une MADA » Doctorat en science en électrotechnique université Mohammed khider Biskra 2015

[11] BELAID et BOUHEDDA « Etude d'un système de conversion d'énergie éolien avec l'utilisation du filtrage actif pour l'amélioration de la qualité d'énergie » master en énergie solaire et éolienne Université de Médéa 2016

[12]Mohammed MEGHDOUR« Commande d'un aérogénérateur alimente par un convertisseur a trois niveau » master en énergie solaire et éolienne université de Médéa 2015

[13] ABDELLI Houaria « Commande par Mode de Glissement d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation » magister en électrotechnique université Mohamed Boudiaf Oran

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

[15] Abdelmadjid CHAOUI « filtrage active triphasé pour charges non linéaires » doctorant en génie électrique école supérieure d'ingénieurs de Poitiers 2006

[16] Samia KEBIRI « Modélisation et simulation d'un filtre active Multiniveaux » magister en électrotechnique UMMTO 2009

[17] Abdelmalek BOUCIF« Filtrage actif d'un réseau Électrique » master en électrotechnique université Mohamed khider de biskra 2014

[18] Amar OMEIRI « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » doctorat en commande électrique université badji mokhtar Annaba 2007

[19]Abdelkader YOUSFI « Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension a cinq niveau » magister en électrotechnique universite hassiba benbouali chlef 2008

[20] OULD ABDESLAM Djaffar « techniques neuromimetriques pour la commande dans les systèmes électriques application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension » doctorat en electonique et électrotechniques université de haute-alsace 2005

[21] DJEGHLOUD Hind « filtrage active de puissance » doctorat en électrotechnique université mentouri constantine 2017

[22] BOUAFIA Abdelouahab « techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance application aux redresseurs a MLI » thèse de doctorat en électrotechniques université ferhat abbas setif 2010