

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة  
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا  
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك  
Département d'Électronique



## Mémoire de Master

Mention Électronique  
Système de vision et robotique

présenté par

MEDJBER REDOUANE

---

### *Influence des harmoniques sur la commande des moteurs asynchrones*

---

Proposé par : Mr BRADAI RAFIK

Année Universitaire 2015-2016

## remerciement

*Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout Puissant, pour toute la puissance qu'il nous a donnée pour réaliser ce travail.*

*Nous exprimons nos plus vifs remerciements à nos promoteurs **Mr : BRADAI RAFIK** qui nous ont aimablement orienté et assidûment dirigé notre travail.*

*Nous présentons aussi nos sincères remerciements à tous les enseignants du département électronique. Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouvent ici notre sincère reconnaissance.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A mes parents, qu'ALLAH les protège,*

*A mes frères et sœurs, merci pour vos encouragements*

*A tous ceux qui m'ont enseigné, je vous suis très reconnaissant,*

*A mes amis sans exception,*

*Redouane.M*

## ملخص

ان المحولات السكنوية تمتص تيارات غير جيبيية وتستهلك عموما القدرة غير الفعالة هاتانالظاهرتان الجديدتان على الشبكة تسببان في عدة اضطرابات تصل الى حد تعطيل وتخريب جزء من الجهاز المتصلة بالشبكة وفي هذا العمل عالجتا التوفيقات المتولدة عن جسر مقوم ثلاثي الطور غير متحكم فيه بواسطة مرشح على التوازي

التحليل الطيفي قبل وبعد الترشيح يمكن من مقارنة النتائج ويثبت مدى فعالية المرشح حيث معامل تشوه تيار الحمل قبل الترشيح 30.83 وبعد الترشيح انخفض الى 1.25

## Rsume

Les convertisseurs statiques absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment généralement de la puissance réactive . ces deux phénomènes nouveaux sur le réseau électrique ont engendrés un certain nombre de problèmes allant du dysfonctionnement d'un équipement jusqu'à sa destruction.

Dans ce travail , on a traité l'élimination par un filtre passif parallèle des harmonique générées par un pont redresseur triphasé non commandé .

La THD du courant de charge avant filtrage est de 30,83 % à été réduite après le filtrage à 1,25% .

## Astract

static converters generate non sinusoidal current and absorb reactive power . these perturbations (harmoniques) are the origin of many problems and effect electrical equipments connected to the power supply.

In this work a passif power filter is used to eliminate harmonics generated by a non lineaic load (uncontrolled three phase ridge rectified) .

The total harmonic distortion (THD) is 30,83 % before using shunt passive filter ; this is reduced to 1,25% .

## Liste des abréviations et signes

ASI	Alimentation Sans Interruption
CEF	Comité Electrotechnique Français
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CEM	Compatibilité électromagnétique
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique
FAP	Filtre actif parallèle
FAS	Filtre actifs série
GTO	Gate Turn-Off
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	Modulation de largeur d'Impulsions
THD	Taux de distorsion harmonique
UPQC	Unified Power Quality Conditionner
UTE	Union Technique de l'Electricité
	<b>B</b>
	Induction magnétique
$C$	Capacité
$C_d$	Couple du démarrage
	$C_{max}$
	Couple maximal
$D$	Puissance déformante
	$F_c$
	Facteur de crête
	$f_n$
	Fréquence de rang harmonique
	$f_1$
	Fréquence du fondamental 50Hz
	$F_p$
	Facteur de puissance
	$f_s$
	Fréquence statorique
$\mathcal{G}$	Glissement
	$H_n$
	Taux de distorsion harmonique individuel
	$i_f$
	Courant du filtre
$I_{max}$	Courant maximale
$I_{rms}, I_{eff}$	Courant efficace
	$i_{rp}$
	Courant du récepteur
$I_d$	Courant du démarrage
	$I_n$
	Courant nominal
	$I_n$
	Courant harmonique de rang $n$
$k$	Coefficient de multiplication

## Liste des abréviations et signes

$L$		Inductance
	$N_r$	Vitesse de rotation du rotor
$P$		Puissance active
	$P_{Foucault}$	Pertes par courant de Foucault
	$P_j$	Pertes Joule
	$Q$	Puissance réactive
$R_r$		Résistance
	$S_n$	Puissance apparente
	$V_r$	Tension au nœud filtre/récepteur
$U$		Tension composé
$V$		Tension simple
	$V_n$	Tension harmonique de rang $n$
	$y_0$	Valeur de la composante continue
	$y_{eff}$	Valeur efficaces d'une onde distorsionnée
	$y_n$	Valeur efficace de l'harmonique de rang $n$
	$Z_{eq}$	L'impédance équivalente du filtre
$\Delta V$		Chute de tension
$IP$		Indice de protection
	$\omega_a$	Pulsation de résonance du filtre
	$\varphi_n$	Déphasage de la composante harmonique de rang $n$
$n$		Taux individuel d'harmonique
	$\omega$	Pulsation de la fréquence du fondamental
	$d$	L'épaisseur des tôles magnétiques
	$\rho$	La résistivité du matériau
$\Omega_s$		Vitesse de synchronisme
$\Omega_r$		Vitesse du rotor

## Liste des abréviations et signes

# Table des matières

Introduction générale .....	1
Chapitre I : les moteurs asynchrones et les variateur de vitesse	
I.1. Les moteurs asynchrones .....	2
I.1.1. Définition .....	2
I.1.2. Description et principe de fonctionnement.....	2
I.1.2.1. Constitution .....	2
I.1.2.1.1. Le stator.....	2
I.1.2.1.2. Rotor bobiné.....	2
I.1.2.1.3. Rotor en court-circuit (ou à cage d'écureuil).....	3
I.1.2.2. Principe de fonctionnement .....	3
I.1.2.3. Glissement .....	3
I.2. Les différents modes de démarrages des moteurs asynchrones.....	3
I.2.1. Démarrage direct.....	3
I.2.2. Démarrage étoile / triangle.....	4
I.2.3. Démarrage par auto – transformateur ou par les gradateurs .....	4
I.3. Différentes types de variation de la vitesse .....	5
I.3.1. Réglage de la vitesse par la modification du nombre de pair de pôles.....	5
I.3.2. Réglage de la vitesse à fréquence variable.....	5
I.3.3. Action sur le glissement .....	6
I.3.3.1. Variation de la tension d'alimentation.....	6
I.3.3.2. Variation de la résistance secondaire.....	6
I.4. exemple d'une plaque signalétique d'un moteur asynchrone.....	6
I.5. Motoréducteurs (SEW) .....	6
I.6. variateurs de vitesses.....	7
I.6.1. définition.....	7
I.6.2. Construction d'un variateur de vitesse.....	7
I.6.2.1. Redresseur triphasé à diodes.....	7
I.6.2.2. Circuit intermédiaire .....	8
I.6.2.3. Onduleur.....	8
I.6.2.4. Circuit de commande .....	9
I.6.3. Modulation de Largeur D'impulsion (MLI).....	9
I.7. Les variateurs ALTIVAR 31.....	10
I.7.1. exemple d'une plaque signalétique d'un variateur l'Altivar 31.....	10

## Table des matières

I.8. Les variateurs MDX61B	I.8.1. Présentation des composants MOVIDRIVE. <sup>R</sup>
MDX61B.....	12
I.8.1.1. Self-réseau .....	12
I.8.1.2. Partie principale du variateur de vitesse MDX61B (façade externe) .....	12
I.8.2. exemple d'un variateur de vitesse (MDX61B 005-5A3-4-00.....	14
I.12. Conclusion .....	14

### Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

II.1. Introduction.....	15
II.2. Les perturbations électriques.....	15
II.2.1. Les surtensions.....	15
II.2.2. Creux de tension et coupure brèves .....	15
II.2.3. Déséquilibre de tension .....	16
II.2.4. Les harmoniques.....	16
II.3. Problèmes liés aux harmoniques.....	16
II.4. Charges industrielles génératrices d'harmoniques .....	18
II.4.1. Appareils générant des courants harmoniques.....	18
II.4.1.1. Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif.....	18
II.4.1.2. Convertisseur de courant.....	18
II.4.2. Appareils générant des tensions harmoniques.....	19
II.4.2.1. Les transformateurs.....	19
II.5. Perturbations harmoniques.....	19
II.5.1. Harmoniques .....	19
II.5.2. Inter-harmoniques.....	19
II.5.3. Infra-harmoniques .....	19
II.6. Surcharge de conducteur de neutre.....	20
II.6.1. Harmonique de rangs 3 et multiples de 3.....	20
II.7. Grandeurs caractéristiques des harmoniques.....	21
II.7.1. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier.....	21
II.7.2. Valeur efficaces d'une onde distorsionnée.....	22
II.7.3. Taux individuel d'harmonique .....	22
II.7.4. Taux global de distorsion .....	22
II.7.5. Facteur de crête .....	23

## Table des matières

II.7.6. Facteur de puissance.....	23
II.7.7. Rang de l'harmonique .....	24
II.7.8. Représentation spectral .....	24
II.8. Notion de charge linéaire et non linéaire.....	25
II.8.1. Charge linéaire.....	25
II.8.2. Charge non linéaire.....	26
II.9. Principaux effets des perturbations harmoniques .....	26
II.9.1. Effets instantanés.....	26
II.9.2. Effets différés.....	26
II.10. Sensibilité des différents types de matériels.....	27
II.11. Réduction de la pollution harmonique.....	28
II.11.1. Absorption sinusoïdale.....	28
II.11.2. Ajout d'une inductance de lissage du courant .....	28
II.11.3. Statocompensateur.....	29
II.11.4. Les filtres passifs.....	29
II.11.5. Les filtres actifs .....	29
II.12. Les normes imposées sur le <b>THD</b> .....	30
II.12.1. Niveau d'émissions .....	30
II.12.2. Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques .....	31
II.12.3. Niveau d'immunité .....	32
II.13. Conclusion .....	33

### Chapitre III étude des filtres actifs et passifs

III.1. Filtrage actif .....	34
III.1.1. Principaux types de filtres .....	34
III.1.2. Principe de fonctionnement du filtre actif .....	35
III.1.3. Classification des filtres actifs .....	35
III.1.3.1. Filtre actif série .....	35
III.1.3.2. Filtre actif parallèle .....	36
III.1.3.3. La combinaison parallèle-série Actifs (UPQC) .....	37
III.1.2. Avantages et inconvénients des filtres actifs.....	37
III.1.2.1. Les avantages des filtres actifs.....	37
III.1.2.2. Les inconvénients des filtres actifs.....	37

## Table des matières

III.1.3. Exemple d'application .....	38
III.2. filtrage passif.....	39
III.2.1. Principe de fonctionnement .....	39
III.2.2. Classification des filtres passifs .....	39
III.2.2.1. Filtre passif parallèle .....	40
III.2.2.1.1. Types de filtre passif parallèles .....	40
III.2.2.1.1.1. Filtre passif résonant .....	40
III.2.2.1.1.2. Filtre passif amorti .....	41
➤ Avantages des filtres amortis .....	41
➤ Inconvénients des filtres amortis.....	42
III.2.3. Cout du filtre passif.....	42
 <b>Chapitre IV technique de filtre passif pour réduire les harmoniques</b>	
IV. Introduction.....	<b>43</b>
IV.1 Modélisation de l'association Source – filtre passif– Charge.....	<b>43</b>
Modélisation du source.....	<b>43</b>
Modélisation de la charge .....	<b>44</b>
Le filtre passif amorti à utiliser.....	<b>45</b>
IV.2 Description globale de la simulation.....	<b>46</b>
IV.3 Résultats de simulation.....	<b>46</b>
IV.4 Techniques de dépollution.....	<b>48</b>
<b>conclusion.....</b>	<b>51</b>
Conclusion générale.....	52

# Liste des tableaux

## Chapitre II

**Tab II.1:** Courants harmoniques émis par un redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif En théorie

**Tab II.2 :** Exemple de limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4).

**Tab II.3:** Niveau de compatibilité des harmoniques en tension (CEI-1000-2-2)

**Tab II.4:** Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-61000-4-13).

## chapitre IV

**Tab IV.1** les valeurs des éléments construisant la structure étudié

**Tab IV.2:** Le taux de distorsion harmoniques individuelles  $H_n$

# Liste des figures

## Chapitre I

**FigI.1** :Eclaté d'un moteur à rotor à cage

**FigI.2** : schéma de câblages étoile-triangle.

**FigI.3** :Variation de la vitesse en agissant sur la fréquence

**FigI.4** : Motoréducteur.

**FigI.5**: redresseur triphasé tout diode

**Fig.I.6** : Tension a la sortie de redresseur

**Fig.I.7** :Représentation d'un onduleur à transistors.

**FigI.8**: Schéma simplifié d'un variateur de vitesse

**Fig I.9**: vue de face de l'Altivar 31

**Fig I.10**.: schéma global du variateur Altivar 31

**Fig I.11** : Self-réseau

**Fig I.12** : logement pour cartes option sur MOVIDRIVE.<sup>R</sup> MDX61B

**Fig I.13** : Schéma globale du variateur MDX61B 005-5A3-4-00

## Chapitre II

**Fig II.1** : Coupure brève et creux de tension

**Fig II.2**: Déséquilibre des tensions triphasées

**Fig II.3** : Pont de redresseur triphasé à diodes alimentant une charge résistive

**Fig II.4** :Courants absorbés par un redresseur à diodes

**Fig II.5** : Spectre harmonique

**Fig II.6**:Superposition de courants harmoniques de rang 3 dans le neutre

**Fig II.7** :une onde déformée est sa décomposition

**Fig II.8** :Pont triphasé à diodes

**Fig II.9** :Spectre des harmoniques pour un pont triphasé à diodes

**Fig II.10** :Charge linéaire

**Fig II.11** :Charge non linéaire

**Fig II.12** : Schéma d'un statocompensateur

## Chapitre III

## Liste des figures

**Fig III.1** : Convertisseur à source de tension

**Fig III.2** : Modèle d'un convertisseur à source de courant.

**Fig III.3** : Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

**Fig III.4** : Filtre actif série

**Fig III.5** : Filtre actif parallèle

**Fig III.6** : Combinaison parallèles-série des filtres actifs

**Fig III.7** : Structure d'un filtre actif parallèle

**Fig III.8** : Exemple de compensation d'harmoniques

**Figure III.9.**(a) Filtre passif série, (b) Filtre passif parallèle

**Figure III.10.** (a) Filtre résonant parallèle, (b) Courbe de résonance

**Figure III.11.**(a) Filtre amorti parallèle, (b) Courbe de résonance

**Figure III.12.** Types de filtre amorti

**Fig III.13** : Filtre actif série et filtre passif parallèle

**Fig III.14** : Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.

**Fig III.15** : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

## chapitre IV

**Fig IV.1** Schéma de principe : source triphasée et une charge non linéaire

**Fig IV.2** schéma Synoptique d'un réseau triphasé

**Fig IV.3** Schéma synoptique d'un pont redresseur

**Fig IV.4** branchement d'un filtre amortie

**Fig IV.5** Tensions de source pour une charge non linéaire

**Fig IV.6** Courants de ligne pour une charge non linéaire

**Fig IV.7** Spectre harmoniques de courant de charge

**Fig IV.8** schéma de principe d'une source triphasée et une charge non linéaire avec filtre

**figure V.9** les tensions de source d'une charge non linéaire avec filtre

**figures IV.10** courants de ligne d'une charge non linéaire avec filtre

**figures V.11** spectre des harmoniques du courant de ligne avec filtre

# Introduction générale

La commande des moteurs asynchrones est basée sur l'électronique de puissance

Notre but est de faire une étude pour l'élimination des courants générés par des charges non linéaires (variateurs de vitesse)

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques.

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Dans de nombreux cas, ces charges se comportent comme des sources de courants harmoniques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution seront présentées. Parmi les solutions le surdimensionnement des éléments composant le réseau, l'utilisation de transformateurs spéciaux, le filtrage passif et le filtrage actif. Les deux derniers moyens mentionnés sont les plus répandus.

Nous avons organisé notre mémoire en trois chapitres :

Nous consacrerons le premier chapitre pour les moteurs asynchrones et les variateurs de vitesse et leurs principes de fonctionnement

Le deuxième chapitre sera consacré à la description des perturbations en courant pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations seront analysées.

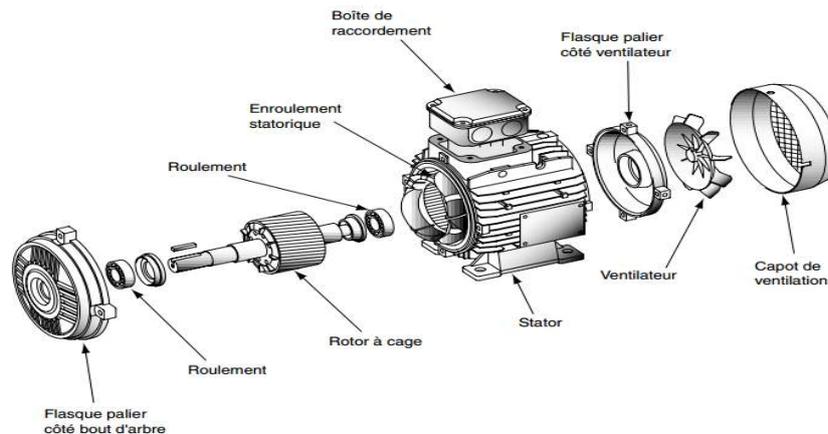
Dans le troisième chapitre, on va étudier les différentes structures concernant les filtres actifs et passifs. Nous détaillerons les avantages, inconvénients,

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale

## I.1. Les moteurs asynchrones

### I.1.1. Définition [2]

Le moteur asynchrone, dit parfois d'induction, est utilisé depuis de très nombreuses années pour assurer la variation de vitesse de processus industriels. Cependant, le développement des semi-conducteurs de puissance permet l'alimentation à fréquence variable.



**FigI.1** :Eclaté d'un moteur à rotor à cage[3]

### I.1.2. Description et principe de fonctionnement [4]

#### I.1.2.1. Constitution

Le moteur asynchrone est constitué d'un inducteur fixe, appelé stator est d'une partie mobile (induit), appelé rotor.

##### *I.1.2.1.1. Le stator*

Le stator comporte une carcasse en fonte ou en tôles d'acier dans laquelle est inséré un circuit magnétique formé d'un empilage de tôles. Le stator d'un moteur asynchrone porte un enroulement triphasé repartit dans des encoches du circuit magnétique, il est généralement couplé en étoile.

##### *I.1.2.1.2. Rotor bobiné*

L'enroulement, semblable à celui du stator, comporte  $p$  paires de pôles par phase ; les trois paires sont reliées à trois bagues qui permettent d'insérer un rhéostat dans le circuit rotorique. Ce moteur est aussi nommé moteur à bagues.

##### *I.1.2.1.3. Rotor en court-circuit (ou à cage d'écureuil)*

Au lieu des conducteurs on dispose des barres (en cuivre ou en aluminium) dans les encoches court-circuitées par deux anneaux, de résistance plus faible, On peut avoir un rotor à encoche profonde, ce procédés son utilisés pour améliorer les performances du démarrage.

# Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

## I.1.2.2.Principe de fonctionnement [5]

Lorsque les enroulements statoriques sont alimentés, ils produisent un champ tournant. Les lignes de flux qui traversent le rotor se déplacent par rapport aux barres conductrices ; un courant induit prend naissance dans ces barres mises en court-circuit par leurs extrémités. L'action du champ magnétique sur ce courant génère des forces (Loi de Laplace), donc un couple qui entraîne le rotor dans le sens du champ tournant. Le couple produit par la machine est un couple moteur car il s'oppose au couple appliqué par la charge qui est à l'origine du glissement.

## I.1.2.3.Glisement

Le glissement de la machine repère la différence relative de vitesse entre de rotation du rotor et vitesse de synchronisme des champs. Le glissement défini par :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s} \quad (1.1)$$

## I.2.Les différents modes de démarrages des moteurs asynchrones[4]

Le démarrage des moteurs asynchrones dépend essentiellement du couple et du courant de démarrage. Dans la majorité des cas on cherche à avoir un couple  $C_d$  relativement important et un appel de courant au démarrage le moindre possible.

Donc on voudrait avoir :

✓  $\frac{C_d}{C_{max}}$  le plus grand possible.

✓  $\frac{I_d}{I_n}$  le plus faible possible.

### I.2.1. Démarrage direct

C'est le mode de démarrage le plus simple.

a) *Avantages* :

- ✓ Simplicité de l'appareillage.
- ✓ Couple important.
- ✓ Temps de démarrage minimal pour à cage.

b) *Inconvénients* :

✓ Au niveau du réseau d'alimentation : en provoquant, une chute de tension non négligeable ( $\Delta V > 5\%$  de  $V$ ) et en sollicitant la fourniture d'une puissance apparente élevée.

✓ Appel de courant très important :  $I_d = (4 \text{ à } 8) I_n$ .

## Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

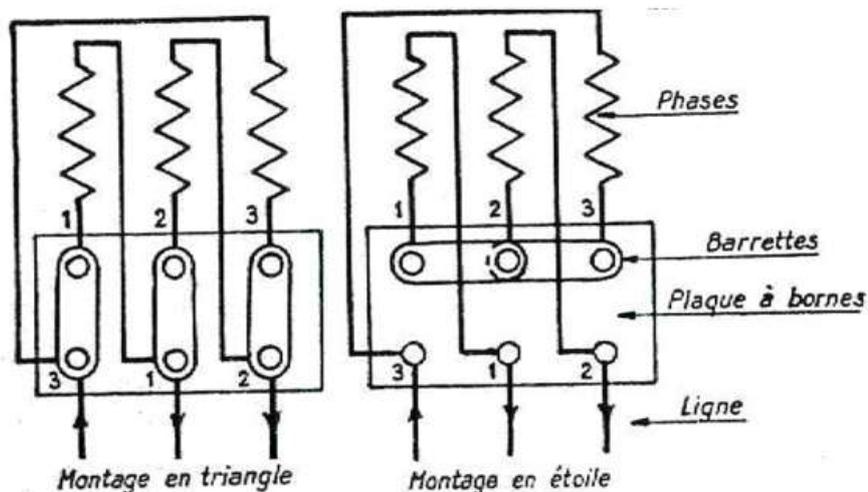
✓ Démarrage brutal.

### I.2.2. Démarrage étoile / triangle

Principe : démarrage s'effectue en deux temps.

*1<sup>er</sup> temps* : mise sous tension et couplage étoile des enroulements, le moteur démarre à tension réduite  $\frac{U}{\sqrt{3}}$ .

*2<sup>ème</sup> temps* : suppression du couplage étoile et mise en couplage triangle le moteur est alimenté à pleine tension.



**Fig1.2** : schéma de câblages étoile-triangle.

*a) Avantages :*

- ✓ Appel de courant en étoile au tiers de valeur en direct.
- ✓ Faible complication d'appareillage.

*b) Inconvénients :*

- ✓ Couple réduit au tiers de sa valeur en direct.
- ✓ Coupure entre les positions étoile et triangle d'où apparition de phénomènes transitoires.

### I.2.3. Démarrage par autotransformateur ou par les gradateurs

*a) Avantages :*

- ✓ Possibilité de choisir le couple de démarrage.
- ✓ Réduction dans le même rapport, du couple et de l'appel de courant.
- ✓ Les phénomènes transitoires sont supprimés.

*b) Inconvénients :*

- ✓ Prix élevés, il faut un transformateur spécial.

*c) Emplois :*

## Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

- ✓ Ce système présente le plus d'avantage technique. Il est utilisé, en général, pour les machines de puissance supérieure à 100 W et convient bien pour les compresseurs rotatifs à piston, les pompes, les ventilateurs.

### I.3. Différentes types de variation de la vitesse [6]

La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone est donnée par l'équation suivante :

$$N_r = (1 - g) \frac{f_s}{P} \left( \frac{tr}{s} \right) \quad (I.2)$$

D'après l'équation (I.2) la variation de la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone peut être effectuée, en agissant sur le nombre de pair de pôles ou en augmentant le glissement ou bien avec le changement de la fréquence statorique.

#### I.3.1. Réglage de la vitesse par la modification du nombre de pair de pôles

On modifie le nombre de pair de pôles (P) par commutation sans modifier l'implantation des bobinages du stator.

Dans la pratique, on construit des moteurs dont le stator prend plusieurs polarités différentes par simple modification du couplage des bobines statoriques convenablement dimensionnées. Le rotor à cage d'écureuil convient à toutes polarités.

#### I.3.2. Réglage de la vitesse à fréquence variable [7]

Quand il est nécessaire de faire varier la vitesse du moteur, on l'alimente par un onduleur de tension fonctionnant à fréquence variable en maintenant le rapport  $\frac{V}{f}$  constant.

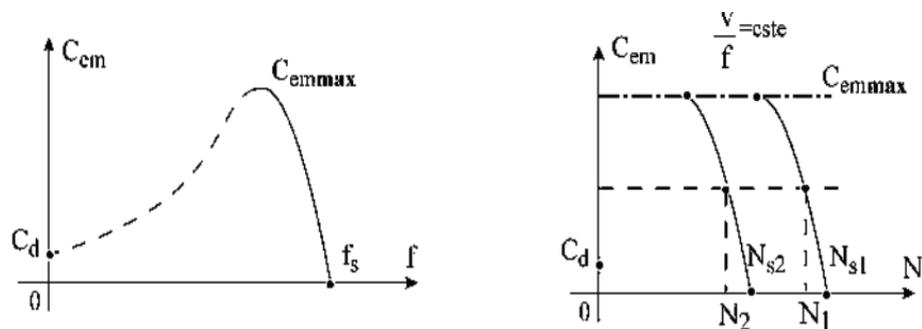


Fig1.3 :Variation de la vitesse en agissant sur la fréquence

## Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

### I.3.3.Action sur le glissement [6]

#### I.3.3.1.Variation de la tension d'alimentation

Le procédé le plus simple pour faire varier la vitesse du moteur asynchrone consiste à alimenter la machine à fréquence constante mais à faire varier la tension à ces bornes.

#### I.3.3.2.Variation de la résistance secondaire

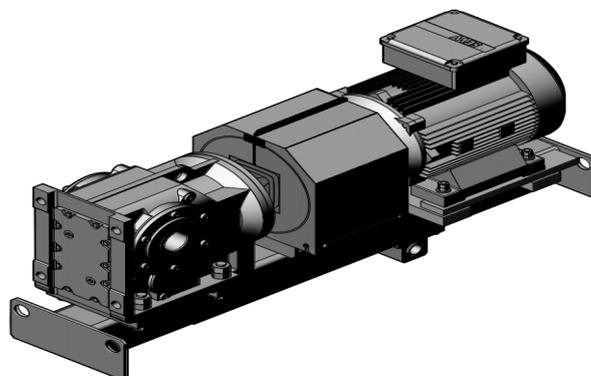
La façon la plus classique d'augmenter le glissement en charge du moteur à rotor bobiné est d'utiliser un rhéostat secondaire.

### I.4. exemple d'une plaque signalétique d'un moteur asynchrone

- ✓ Type: KA37 DT80N4
- ✓  $f_n = 225 \text{ Hz}$
- ✓  $N_n = 1380 \text{ tr /min}$
- ✓  $I_n = 1.15 \text{ A}$
- ✓  $U_n = 400 \text{ V}$
- ✓  $\text{Cos}(\varphi) = 0.81$
- ✓  $P(W) = 750$
- ✓  $\text{IP} = 65$

### I.5.Motoréducteurs (SEW) [8]

Les variateurs de vitesse sont les compléments parfaits aux motoréducteurs pour former un système d'entraînement complet optimal. Il est possible d'obtenir des vitesses de sortie particulièrement lentes en utilisant les motoréducteurs.



**FigI.4** : Motoréducteur.

# Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

## I.6. variateurs de vitesses[9]

### I.6.1.Variateurs de vitesses

Le variateur de vitesse est un dispositif électronique de puissance, qui convertit une alimentation triphasée de tension et de fréquence constante en tension continue; puis transforme cette tension en une nouvelle alimentation triphasée de tension et fréquence variables. Cette dernière peut être utilisée pour le réglage continu de la vitesse des moteurs asynchrones triphasés. On l'insère entre le réseau et le stator du moteur. Il offre la possibilité de régler la vitesse d'un moteur asynchrone d'une manière progressive toute en gardant le couple constant.

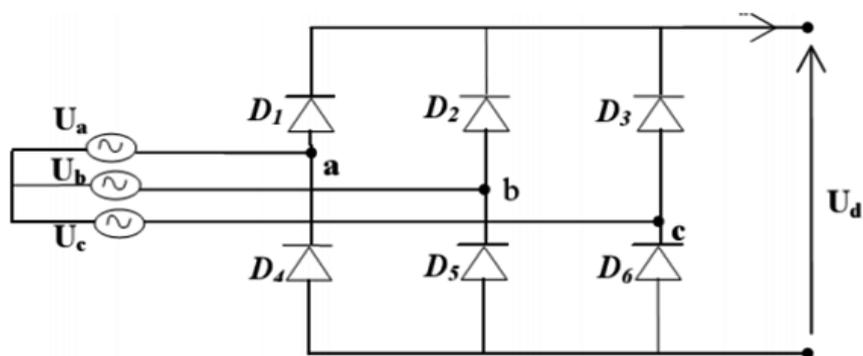
### I.6.2.Constitution d'un variateur de vitesse

Depuis la fin des années 60, les variateurs de vitesse ont évolué très rapidement suite au développement des microprocesseurs et semi-conducteurs et à la baisse de leurs prix. Les principes de base des variateurs de vitesse n'ont cependant pas changés.

Les variateurs de vitesse constitués de quatre composants principaux :

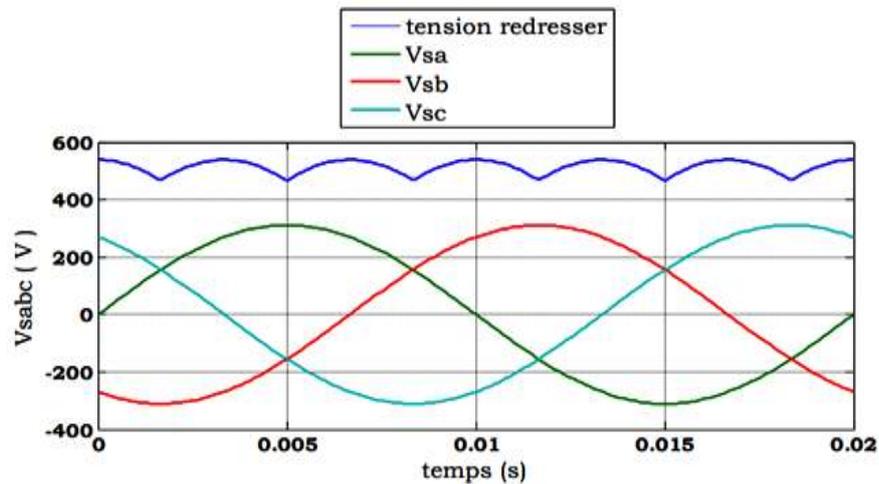
#### I.6.2.1.Redresseur triphasé à diodes

La fonction du redresseur au sein du variateur de vitesse est de transformer la tension triphasée alternative en tension continue monophasée.



FigI.5: redresseur triphasé tout diode

La tension redressée est représentée dans la (figure I.6)



**Fig.I.6 :** Tension a la sortie de redresseur

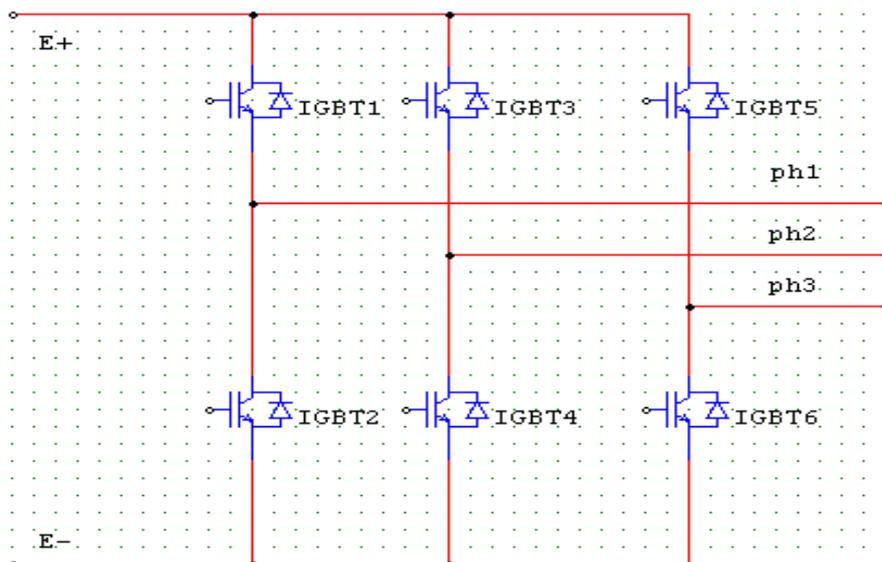
## I.6.2.2. Circuit intermédiaire

L'alimentation continue de l'onduleur est assurée par redresseur par l'intermédiaire d'un filtre LC dont le principal intérêt est de filtrer les ondulations de la tension continue à la sortie de redresseur.

## I.6.2.3. Onduleur

L'onduleur de tension est un convertisseur statique, constituées de cellules de commutation généralement à transistor ou à thyristor GTO pour les grandes puissances, il permet d'imposé à la machine des ondes de tension à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220V/380V-50Hz. Après redressement, la tension continue filtrée est appliquée à l'onduleur.

Le schéma structurel d'un tel onduleur triphasé est illustré par la figure I.7.



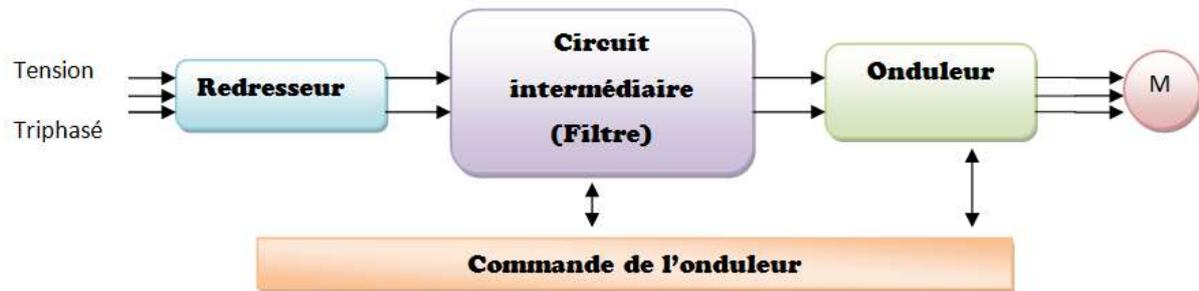
**Fig.I.7 :** Représentation d'un onduleur à transistors.

# Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

## I.6.2.4.Circuit de commande

Le circuit de commande est la quatrième partie principale du variateur de vitesse. Ce circuit, appelé couramment carte de commande, a quatre fonctions essentielles suivantes :

- 1- Commande des semi-conducteurs du variateur de vitesse.
- 2- Echange de données entre le variateur de vitesse et les périphériques.
- 3- Collecte de compte-rendu de message de défaut.
- 4- Exécution des fonctions protectrices pour le variateur de vitesse et le moteur.



**FigI.8:** Schéma simplifié d'un variateur de vitesse

## I.6.3. Modulation de Largeur D'impulsion (MLI) [10]

Le principe de la MLI utilisée dans le pont onduleur consiste à appliquer aux enroulements du moteur une suite d'impulsions de tension, d'amplitude égale à la tension continue fournie par le redresseur. Les impulsions sont modulées en largeur de manière à créer une tension alternative d'amplitude variable.

La MLI alimente les machines à courant alternatif par des courants sinusoïdaux..

## I.7.Les variateurs ALTIVAR 31[11]

Le variateur Altivar 31 est un convertisseur de fréquence pour moteurs asynchrones triphasés à cage. L'Altivar 31 est robuste, peu encombrant, facile à mettre en œuvre. Il est livré avec radiateur pour ambiances normales et enveloppes aérées. Il est possible de monter plusieurs côte à côte, ce qui entraîne un gain de place important.

Il intègre des fonctions répondant aux applications les plus courantes, notamment:

- ✓ Manutention (petits convoyeurs, palans ...),
- ✓ Machines d'emballage et de conditionnement,
- ✓ Machines spécialisées (mélangeurs, malaxeur, ...),
- ✓ Pompe, compresseur, ventilateur,

## Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

### I.7.1. exemple d'une plaque signalétique d'un variateur l'Altivar 31

A l'entrée du variateur :

- ◆  $U(V) = 380/500$  ;
- ◆  $I(A) = 3,6 \text{ max}$  ;
- ◆  $f(\text{Hz}) = 50/60$  ;

✓ A la sortie du variateur :

- ◆  $U(V) = 380/500$  ;
- ◆  $I(A) = 2,3$  ;
- ◆  $f(\text{Hz}) = 0,5/500$  ;

Le schéma d'un variateur de vitesse Altivar 31 est représenté dans la figure I.10.

# Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

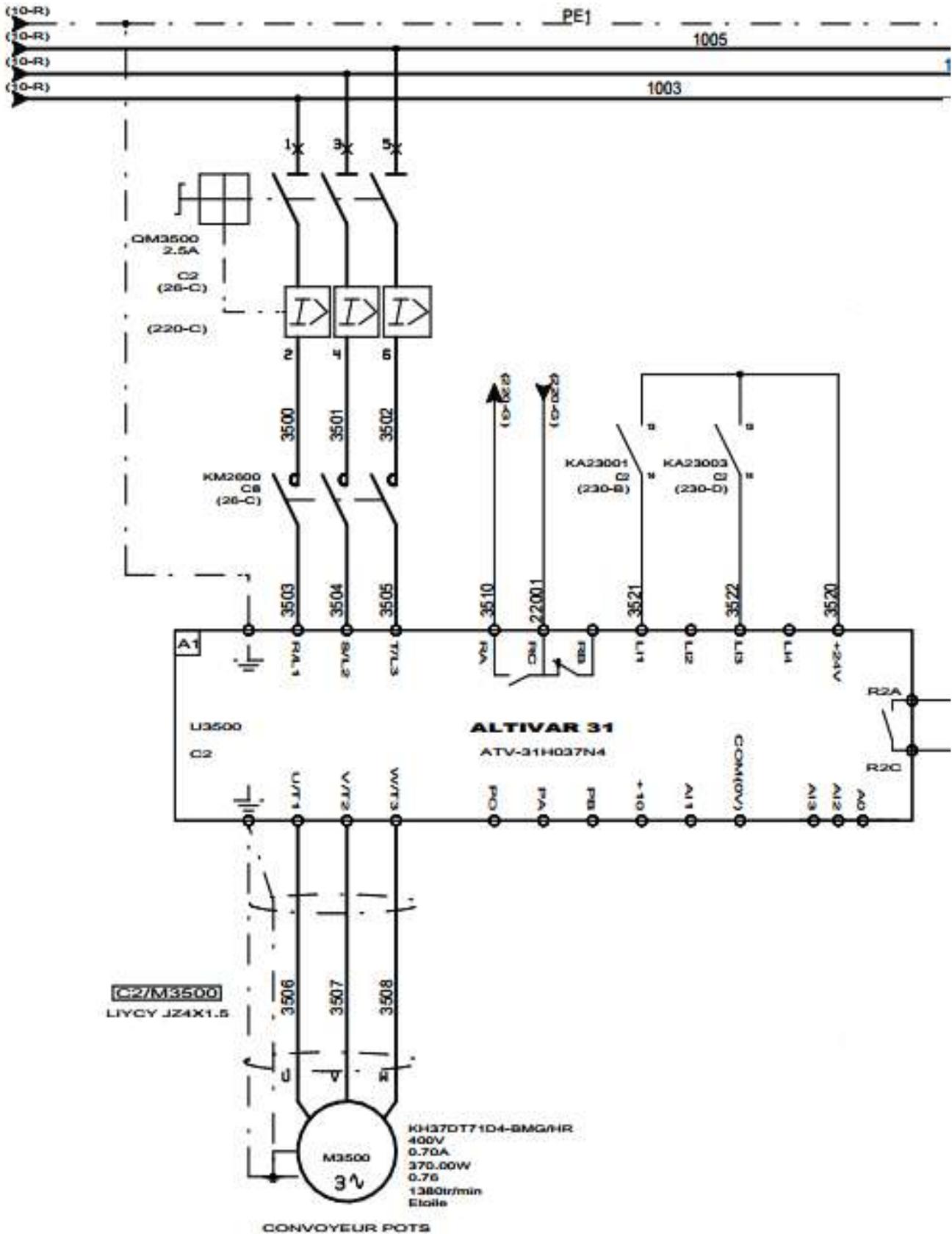


Fig I.10.: schéma global du variateur Altivar 31

## Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

### I.8. Les variateurs MDX61B[12]

Ce sont des variateurs pour les moteurs asynchrones triphasés.

#### I.8.1. Présentation des composants MOVIDRIVE.<sup>®</sup> MDX61B

##### I.8.1.1. Self-réseau

Elle sert à la :

- ✓ Protection du variateur contre les surtensions réseau.
- ✓ Limitation du courant d'enclenchement si plus de trois variateurs sont branchés en parallèle.



Fig I.11 : Self-réseau

##### I.8.1.2. Partie principale du variateur de vitesse MDX61B (façade externe)

Les variateurs MOVIDRIVE.<sup>®</sup> MDX61B disposent des logements pour cartes options.

Taille 0 (0005...0014)

Taille 1 à 6 (0015... 1320)

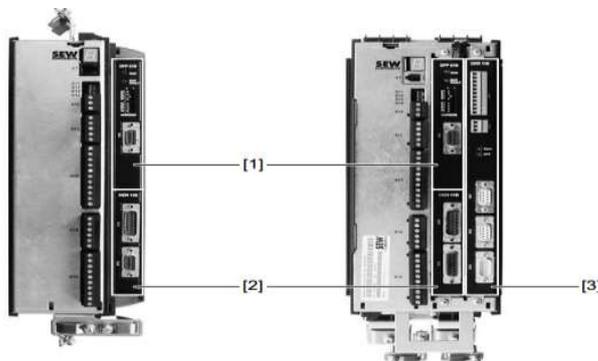


Fig I.12: logement pour cartes option sur MOVIDRIVE.<sup>®</sup> MDX61B

- [1] Logement bus de terrain pour option de communication.
- [2] Logement pour option codeur.
- [3] Logement carte extension pour options de communication (uniquement tailles 1 à 6).

Le schéma d'un variateur de vitesse MDX61B est représentée dans la figure I.13.



## Chapitre I Les moteurs asynchrones et variateurs de vitesse

### I.8.2. exemple d'une plaque signalétique d'un variateur de vitesse

(MDX61B 005-5A3-4-00)

A l'entrée du variateur :

- ◆  $P = 0.5 \text{ KW}$  ;
- ◆  $U(V) = 380/500$  ;
- ◆  $F(\text{Hz}) = 50/60$  ;

A la sortie du variateur :

- ◆  $U(V) = 380/500$  ;
- ◆  $I(A) = 2,3$  ;
- ◆  $F(\text{Hz}) = 0,5/500$  ;

### I.12. Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les différents moteurs et variateurs de vitesses et leurs principes de fonctionnement.

# Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

## II.1.Introduction

Parmi les perturbations électriques que nous avons traitées dans ce chapitre sont les perturbations harmoniques et leurs grandeurs caractéristiques.

Les charges non linéaires sont les principales causes de ces perturbations harmoniques en raison de la multiplication des composants semi-conducteurs.

Les effets de ces perturbations sont connus pour la destruction des équipements électriques.

Dans la fin de ce chapitre nous allons mentionner les normes imposées sur le taux de distorsion harmonique (THD).

## II.2.Les perturbations électriques [14]

### II.2.1.Les surtensions

La surtension est une augmentation de la tension jusqu'à dépassement de la plage nominale d'une variation de l'ordre de 10%.

### II.2.2.Creux de tension et coupure brèves

Les creux de tension sont généralement définis comme une baisse de 10% à près de 100% de la valeur nominale de la tension pendant un temps compris entre 10ms et quelques secondes.

Lorsque la tension est absente (baisse de tension de 100%) pendant 1s à 1mn on parle de « coupure brève » et entre 10ms et 1s de « coupure très brève ».

Lorsque la durée est  $\leq 10\text{ms}$ , la coupure est généralement due à des phénomènes transitoires ou volontaires, par exemple l'emploi de gradateur, les défauts de courts circuits.

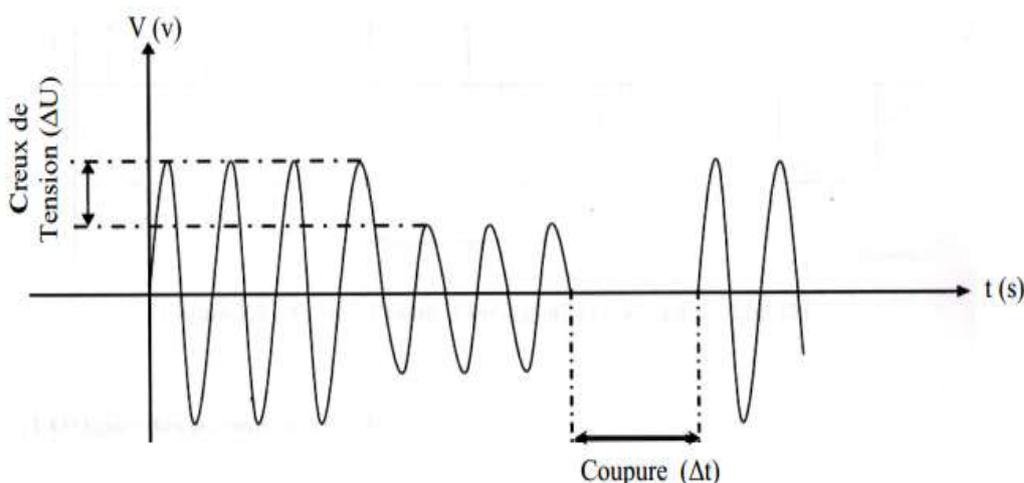


Fig II.1 : Coupure brève et creux de tension

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

### II.2.3. Déséquilibre de tension

L'inégalité en amplitude des tensions des trois phases est due à l'inégalité des puissances appelées sur chaque phase. Ce déséquilibre résulte essentiellement de la présence de fortes charges monophasées raccordées de manière non uniforme au réseau.

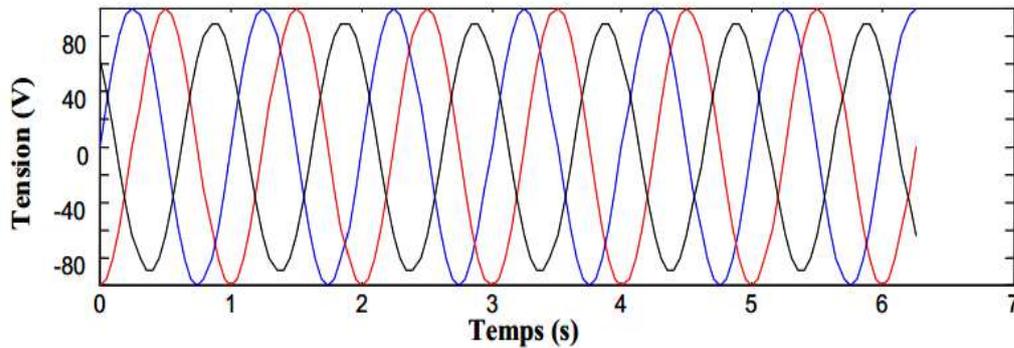


Fig II.2: Déséquilibre des tensions triphasées

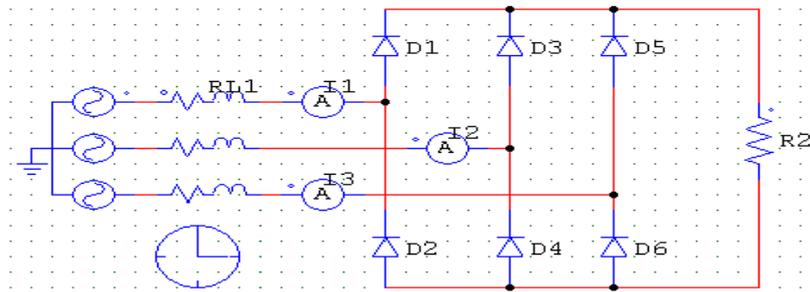
### II.2.4. Les harmoniques

Ce sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Les principaux harmoniques présents sont le troisième, le cinquième, le septième et le neuvième.

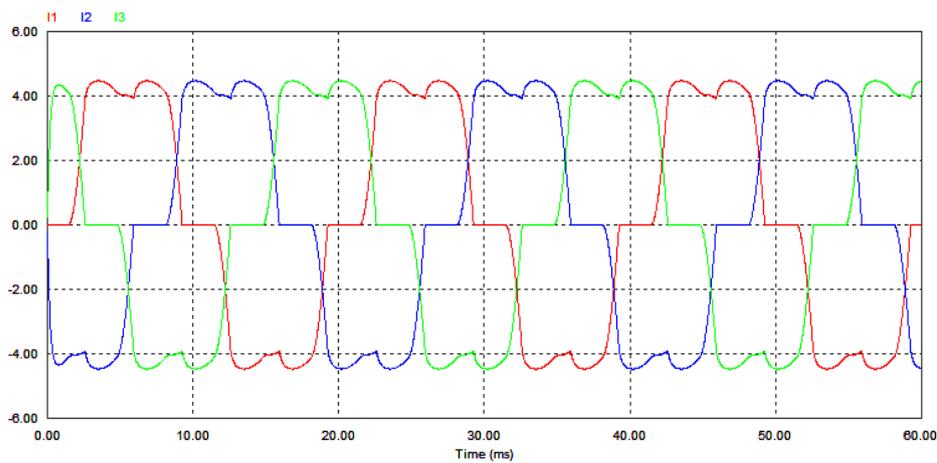
### II.3.Problèmes liés aux harmoniques [15]

Certains appareils, contenant en général des éléments d'électronique de puissance, absorbent un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ces charges sont connues sous le nom de charges non linéaires et sont principalement à l'origine de la distorsion harmonique présente sur le réseau. La Figure II.4 illustre les courants non sinusoïdaux absorbés par la charge non linéaire la plus répandue : le redresseur à diodes ou à thyristors. Ce dispositif génère les harmoniques impairs non multiples de 3 (dans le cas triphasé), les plus importants étant les harmoniques 5, 7, 11 et 13 illustrés dans la figure II.5.

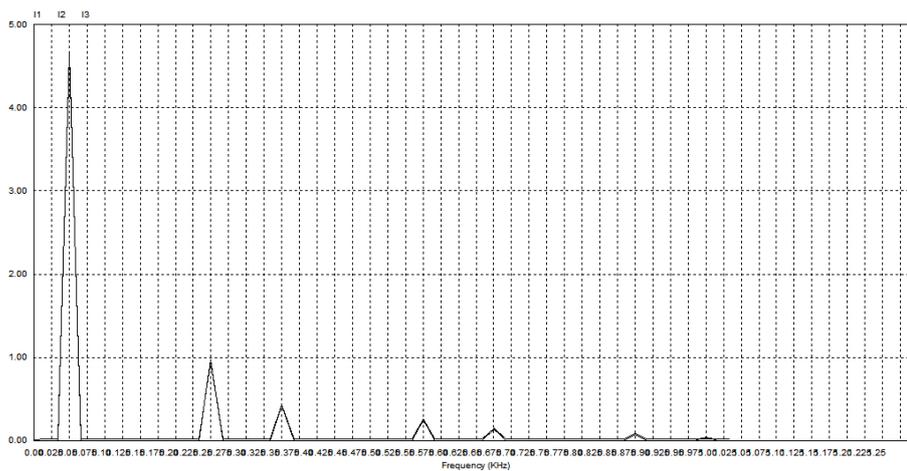
## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques



**Fig II.3** : Pont de redresseur triphasé à diodes alimentant une charge résistive



**Fig II.4** : Courants absorbés par un redresseur à diodes



**Fig II.5** : Spectre harmonique

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

### II.4.Charges industrielles génératrices d'harmoniques [16] [17]

#### II.4.1.Appareils générant des courants harmoniques

L'avènement de l'électronique de puissance a eu un impact majeur sur le monde industriel au cours des dernières décennies .Cet avènement s'est produit par l'arrivée sur le marché des composants d'électronique de puissance tels les thyristors ,les diodes ,les GTO, les IGBT ou les transistors de forte puissance .Ces composants sont permis le développement de convertisseurs statiques de grande puissance qui permettent la conversion de la puissance électrique d'une forme quelconque à une autre forme .Ces convertisseurs apportent un progrès considérable au niveau des procédés industriels .Ils sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique .Nous présentons les charges les plus importantes :

##### II.4.1.1.Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif

Ce montage est utilisé comme premier étage pour la commande en vitesse variable des machines asynchrones. La commande de la machine asynchrone en vitesse variable est utilisée dans des applications comme l'entraînement de compresseurs, de ventilateurs, de pompes, de convoyeurs...etc.

Le contenu harmonique du courant absorbé par ce type de convertisseur et particulièrement important en comparaison des autres injecteurs rencontrés dans le secteur industriel tableau II.1.

Rang harmonique	3	5	7	11	13
Module (en % I1)	0	80	60	30	25

**TabII.1:**Courants harmoniques émis par un redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif

En théorie, les seuls rangs présents dans le spectre d'émission sont de la forme :

$$n = 6K \pm 1 , K \text{ entier}$$

##### II.4.1.2.Convertisseur de courant

Les convertisseurs de courant constituent l'un des montages les plus répandus dans le secteur industriel. Ce type de montage est constitué de thyristors qui sont commandés en ouverture.

Ceci ce fait en jouant sur l'angle d'allumage  $\alpha$  de commande des gâchettes des thyristors .Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles.

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

### a) La commande en vitesse variable des moteurs à courant continu

Les machines à courant continu sont utilisées dans de multiples activités nécessitant de la vitesse variable aussi bien dans les applications de faible puissance.

### b) La commande en vitesse variable des machines synchrones

On rencontre des convertisseurs de courant suivis d'un onduleur pour commander la machine synchrone en vitesse variable.

## II.4.2.Appareils générant des tensions harmoniques [14]

### II.4.2.1.Les transformateurs

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours inférieur à 1%.

## II.5.Perturbations harmoniques

### II.5.1.Harmoniques [19]

$y_n$  pour  $n \geq 2$  est la composante harmonique de rang  $n$  du signal  $y(t)$ , c'est-à-dire la valeur efficace de la sinusoïde de fréquence égale à  $n$  fois celle du réseau d'alimentation.

### II.5.2.Inter-harmoniques [16]

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiples entiers de la fréquence fondamentale (130Hz, 170Hz, ...) c'est-à-dire situées entre les harmoniques.

Certains sont émis par les charges non linéaires, d'autres sont injectés intentionnellement par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et ainsi piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels.

### II.5.3.Infra-harmoniques

Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont des fréquences inférieures à celle du fondamentales : 10Hz, 20Hz, ...

La présence d'inter-harmoniques ou d'infra-harmoniques est due à des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs. Dans ce cas, le signal n'est pas périodique à une période du fondamental  $T$ , ce qui explique l'apparition de composantes supplémentaires à celles du développement en série de Fourier.

Ces variations sont provoquées par des machines telles que :

- ✓ Cycloconvertisseurs.

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

✓ cascade hypo synchrone.

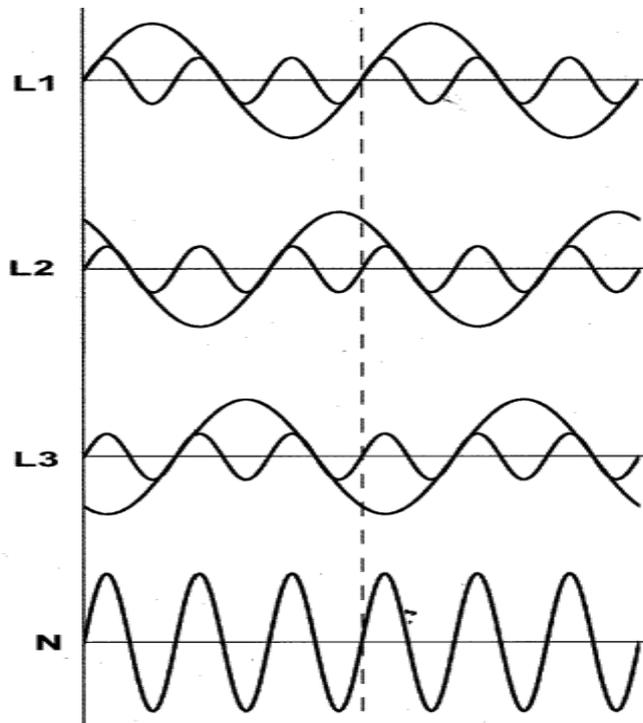
### II.6. Surcharge de conducteur de neutre[21]

#### II.6.1. Harmonique de rangs 3 et multiples de 3

Dans les installations où le neutre est distribué, les charges non-linéaires peuvent entraîner dans ce conducteur des surcharges importantes par la présence de l'harmonique de rang 3.

Si les charges sont linéaires, les courants constituent un système triphasé équilibré. La somme de courants de phase est donc nulle, ainsi que le courant du neutre.

$$I_n = \sum I_i = 0$$



**Fig II.6:**Superposition de courants harmoniques de rang 3 dans le neutre

Dans le cas de charges non linéaires, les courants de phases ne sont pas sinusoïdaux et contiennent donc des harmoniques, pouvant même être multiple de rang 3.

Les composantes harmoniques de rang trois (et tous ses multiples, le rang six, neuf, etc.) des courants de chaque conducteur actif sont tous en phases les uns les autres (c'est-à-dire qu'ils sont homopolaires), et donc s'additionnent arithmétiquement au lieu de s'annuler par addition vectorielle Figure II.6.

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

### II.7. Grandeurs caractéristiques des harmoniques

#### II.7.1. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier [22] [23]

Joseph FOURIER a démontré que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux dont le premier, à la fréquence de répétition de la fonction, est appelé fondamental, et les autres à des fréquences multiples du fondamental appelés harmoniques.

Formule de FOURIER :

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} y_n \sqrt{2} \sin(n \omega t - \varphi_n) \quad (II.1)$$

Avec

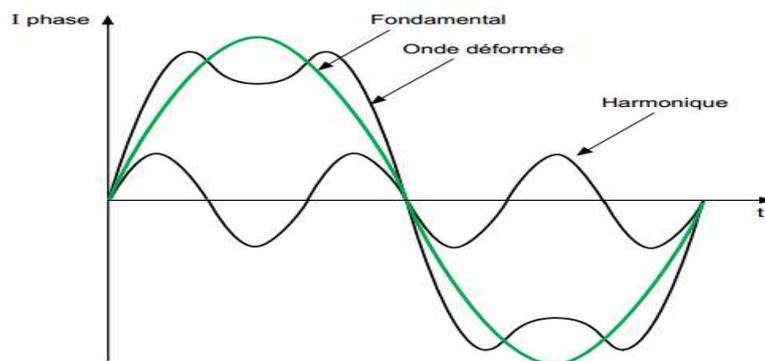
$y_0$  : Valeur de la composante continue généralement nulle.

$y_n$  : Valeur efficace de l'harmonique de rang n.

$\omega$  : Pulsation de la fréquence du fondamental.

$\varphi_n$  : Déphasage de la composante harmonique de rang n.

La figure illustre un exemple de cette décomposition



**Fig II.7** :une onde déformée est sa décomposition

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

### II.7.2.Valeur efficaces d'une onde distorsionnée [24]

La valeur efficace est responsable des échauffements. Pour une grandeur périodique non sinusoïdale, son expression est la suivante :

$$y_{eff} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (y_n)^2} \quad (II.2)$$

### II.7.3.Taux individuel d'harmonique

Selon les organismes, le taux individuel d'harmonique est défini différemment.

Il sera soit :

✓ Le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique de rang  $n$  est la valeur efficace du fondamental pour la norme CIGREE :

$$H_n(\%) = 100 \frac{y_n}{y_1} \quad (II.3)$$

✓ Le rapport entre la valeur efficace d'un harmonique de rang  $n$  est la valeur efficace du signal pour la norme CEI :

$$H_n(\%) = 100 \frac{y_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (y_n)^2}} \quad (II.4)$$

### II.7.4.Taux global de distorsion

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

De la même manière, le taux de distorsion sera :

✓ Le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental pour la norme CIGREE.

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (y_n)^2}}{y_1} \quad (II.5)$$

✓ Le rapport entre la valeur efficace des harmoniques à celle de la grandeur alternative, pour la norme CEI.

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (y_n)^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} (y_n)^2}} \quad (II. 6)$$

Avec :

$THD$  : taux de distorsion harmoniques.

$y_n$  : Valeur efficace de l'harmonique de rang  $n$ .

$y_1$  : Valeur efficace de l'harmonique à la fréquence fondamentale.

### II.7.5.Facteur de crête[25]

Le facteur de crête  $F_c$  est donné par l'équation suivante :

$$F_c = \frac{\text{valeur crête}}{\text{valeur efficace}} \quad (II. 7)$$

Pour une onde sinusoïdale  $F_c$  est égal à  $\sqrt{2}$ . Le facteur de crête peut atteindre des valeurs supérieures à 5 pour des ondes très déformées.

### II.7.6.Facteur de puissance

Dans le cas d'un réseau équilibré, la puissance apparente  $S$  est définie par :

$$S(va) = V_{eff} \cdot I_{eff} \quad (II. 8)$$

La puissance active  $P$ , conséquence d'un déphasage entre les fondamentaux du courant et de la tension est alors :

$$P(w) = V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos(\alpha) \quad (II. 9)$$

Le facteur de puissance  $F_p$ , défini par le rapport entre la puissance active et la puissance apparente s'exprime par :

$$F_p = \frac{P}{S} \quad (II. 10)$$

La puissance réactive  $Q$ , est quant à elle définie par :

$$Q(var) = V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin(\alpha) \quad (II. 11)$$

A fin d'estimer la participation des harmoniques dans la puissance apparente, on utilise la notion de puissance déformante  $D$  définie par :

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

$$D(w) = V_{eff} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2} \quad (II.12)$$

$I_n$ :La valeur efficace de l'harmonique de rang  $n$ .

La puissance apparente peut donc se mettre sous la forme :

$$S(var) = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (II.13)$$

Le facteur de puissance s'écrit alors :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (II.14)$$

D'où, on peut constater que le facteur de puissance se dégrade par la présence d'harmoniques d'une part et la consommation d'énergie réactive d'autre part.

### II.7.7.Rang de l'harmonique[22]

C'est le rapport de sa fréquence  $f_n$  à celle du fondamental, la fréquence industrielle 50 Hz.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (II.15)$$

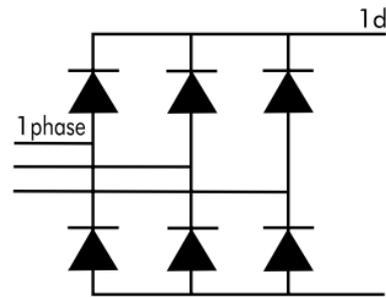
Par principe, le fondamental  $f_1$  a le rang 1.

### II.7.8.Représentation spectral

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié.

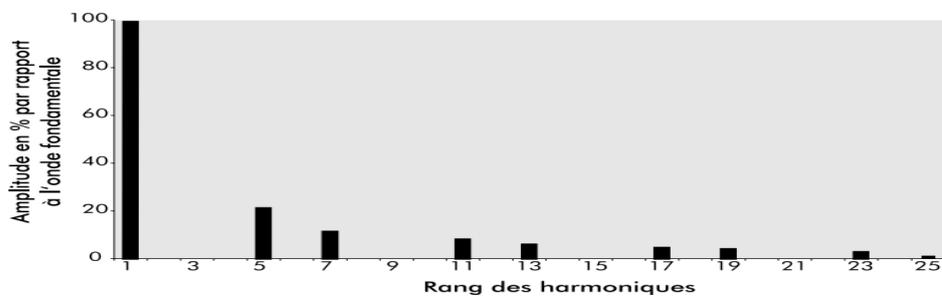
Les variateurs de vitesse, les unités ASI et les convertisseurs de courant sont d'une façon générale alimentés par un pont triphasé avec un nombre de pulsation égale à 6 représenté dans la figure II.8.

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques



**Fig II.8 :** Pont triphasé à diodes

Un spectre typique est donné à la figure II.9

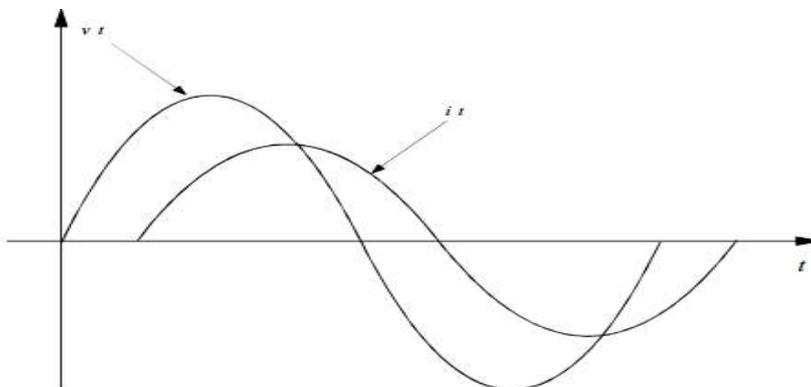


**Fig II.9 :** Spectre des harmoniques pour un pont triphasé à diodes

### II.8. Notion de charge linéaire et non linéaire

#### II.8.1. Charge linéaire

Une charge est dite linéaire lorsque son impédance est constante, le courant qu'elle absorbe est alors sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale.



**Fig II.10 :** Charge linéaire

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

### II.8.2.Charge non linéaire.

Une charge est dite non linéaire lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le courant qu'elle absorbe n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale.

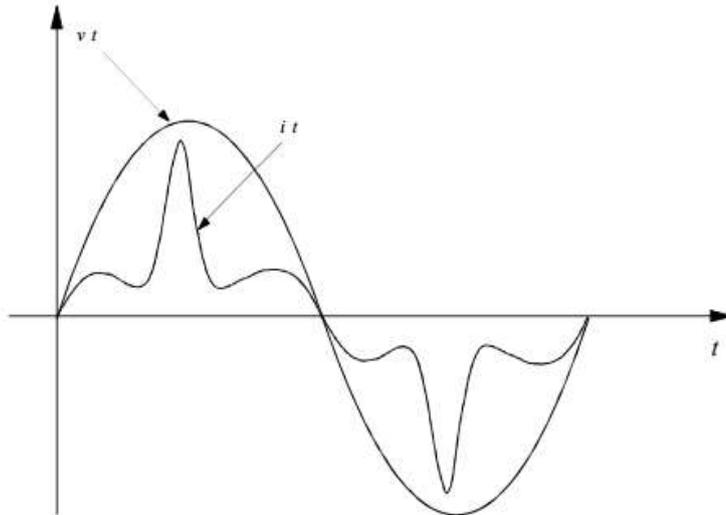


Fig II.11 :Charge non linéaire

## II.9.Principaux effets des perturbations harmoniques

### II.9.1.Effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le fonctionnement d'un matériel, comme les parasites qui perturbent les appareils de mesure, ce type d'effets est dû à la déformation de l'onde et aux phénomènes de résonance, il peut aussi causer les déclenchements intempestifs de disjoncteurs ou de relais d'automatisme.

- a. perturbation des matériels électroniques.
- b. Vibrations et bruits
- c. Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais.

### II.9.2.Effets différés

Ce sont les effets qui apparaissent après une exposition plus au moins longue au phénomène. Ils se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités, une indisponibilité et même une destruction complète de l'appareil.

Les effets différés sont classés selon le délai avant destruction comme suit :

- ✓ effets à court terme (quelque secondes).

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

- ✓ Effets à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures).
- ✓ Effets à long terme (de quelques heures à quelques années).
- a. Echauffement des condensateurs.
- b. Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs.
- c. Echauffement des câbles et des équipements.

### II.10.Sensibilité des différents types de matériels

#### 1. Machines asynchrone

La circulation des courants harmoniques dans les enroulements du moteur, crée des échauffements supplémentaires ainsi qu'une altération, généralement faible, du couple moteur.

#### 2. Transformateur

Ils subissent des échauffements supplémentaires en présence des courants harmoniques et peuvent également entrer en résonance mécanique aux fréquences harmoniques, ce qui entraîne outre l'inconvénient sonore, une fatigue mécanique. Les pertes dans le transformateur se composent :

- ✓ Des pertes Joule dans les enroulements :

$$P_j = R. I_{eff}^2 \quad (II. 16)$$

- ✓ Des pertes par courant de Foucault :

$$P_{Foucault} = \frac{\pi^2}{6} \times \frac{d^2}{\rho} \times B_{eff}^2 \times F^2 \quad (II. 18)$$

$d$  : L'épaisseur des tôles magnétiques [mm].

$\rho$  : La résistivité du matériau [ $\Omega/m^2$ ].

$B$  : L'inductance magnétique [T].

#### 3. Câbles de puissance

La circulation de courants harmoniques dans les câbles se traduit par des pertes Joule supplémentaires selon la loi d'Ohm.

$$P = R. I_{eff}^2 = R. \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \quad (II.19)$$

## **Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques**

### **4. Compteur électrique**

La précision des mesures de puissances : active, réactive et apparente est influencée par la présence d'harmonique de tension et du courant.

La puissance apparente peut s'écrire en faisant apparaître la notion de la puissance déformante D :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

### **5. Relais de protection des réseaux**

La présence de courants harmoniques se traduit par des déclenchements intempestifs ou par une perte de précision du seuil de déclenchement.

## **II.11.Réduction de la pollution harmonique**

### **II.11.1.Absorption sinusoïdale**

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde avec un facteur de puissance unitaire. Dans ce cas, ces structures se positionnent dans une stratégie préventive et non curative. Ces techniques de prélèvement sinusoïdal s'appliquent aux structures monophasées et triphasées. Ces convertisseurs propres utilisent la technique MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) également appelée PWM (Pulse Width Modulation) comme principe de pilotage des interrupteurs commandés. En monophasé ce type de structure est assez répandu alors que les convertisseurs triphasés propres sont rares sur le marché, car le surcoût est important. L'évolution de la normalisation peut imposer ce type de convertisseur dans l'avenir.

### **II.11.2.Ajout d'une inductance de lissage du courant**

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevées puisque leurs impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire. De plus, elles doivent être dimensionnées pour le courant nominal circulant en ligne.

On constate dans les deux cas suivants que les allures du courant généré par des charges non linéaires sont éloignées de l'allure sinusoïdale.

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

### II.11.3.Statocompensateur

Le statocompensateur constitue une application originale des gradateurs triphasés. Pour obtenir une source de puissance réactive continûment variable, on monte en parallèle des condensateurs créant un maximum de puissance nécessaire et une inductance triphasée commandée par un gradateur. Les condensateurs jouent, dans cet équipement, un double rôle : ils créent la puissance réactive ; ils offrent un trajet de faible impédance aux courants harmoniques venant de l'inductance et réduisent ainsi très fortement les harmoniques des courants pris au réseau par l'ensemble de l'équipement.

Il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance,

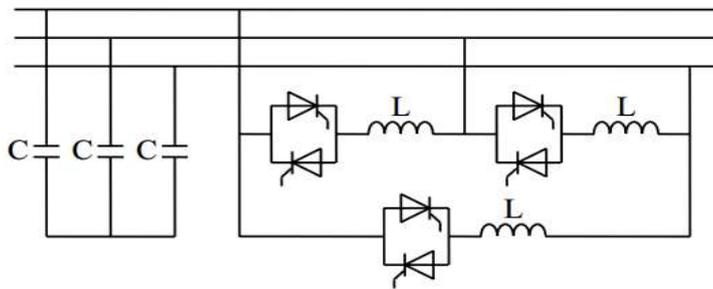


Fig II.12 : Schéma d'un statocompensateur

### II.11.4.Les filtres passifs

Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et, du même coup, éliminer les tensions harmoniques résultantes. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir une résonance série sur une fréquence déterminée.

### II.11.5.Les filtres actifs

On trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- ✓ Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux).
- ✓ Le filtre actif hybride (série, parallèle).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

## **Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques**

### **II.12. Les normes imposées sur le THD**

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies :

- ✓ au niveau international par la CEI (Commission Electrotechnique Internationale).
- ✓ au niveau européen par la CENELEC (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique).
- ✓ au niveau Français par l'UTE (Union Technique de l'Electricité) et le CEF (Comité Electrotechnique Français).

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré. Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de :

- ✓ garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes.
- ✓ contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits.
- ✓ assurer la qualité des produits.

Il s'agit de limitations qui sont maintenant très anciennes (plus de 20ans). Ci-dessous, nous allons détailler les normes internationales les plus récentes concernant les courants et les tensions.

#### **II.12.1.Niveau d'émissions**

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre 230 V (monophasé) et 600 V (triphase).

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

Rang harmonique	Courant harmonique En % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	$\leq 0.6$
13	0.9
25	0.8
27	$\leq 0.6$
29	0.7
31	0.7
$\geq 33$	$\leq 0.6$
Pair	$\leq 0.6$ ou $\leq 8/n$

**Tab II.2 :** Exemple de limitation des émissions de courants harmoniques (CEI 61000-3-4).

### II.12.2.Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques :

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques de tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement. Le tableau II.3 présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmonique pairs	
rang	$V_n(\%)$	Rang	$V_n(\%)$	Rang	$V_n(\%)$
5	6	3	5	2	2
7	6	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+0.5*25/n$				

**Tab II.3:** Niveau de compatibilité des harmoniques en tension (CEI-1000-2-2)

### II.12.3.Niveau d'immunité

La norme CEI 61000-4-13 précise les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique. Le tableau II.3 indique les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles et les réseaux industriels.

## Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques

<b>Rang harmonique</b>	<b>Matériels et systèmes sensibles</b>	<b>Réseaux Industriels</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>
<b>3</b>	8	8
<b>5</b>	8	12
<b>7</b>	6.5	10
<b>9</b>	2.5	4
<b>11</b>	5	7
<b>13</b>	4.5	6
<b>15</b>	-	3
<b>17</b>	3	5
<b>19</b>	2	5
<b>21</b>	-	2
<b>23</b>	2	4
<b>25</b>	2	4
<b>27</b>	-	2
<b>29</b>	1.5	4
<b>31</b>	1.5	3

**Tab II.4:**Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-610004-13).

### II.13. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons traités quelques perturbations électriques du réseau industriels, on a consacré la plus part de temps à expliquer les perturbations harmoniques leurs origines et les effets sur le matériels électriques.

Cette pollution harmonique à des effets nocifs. Pour réduire ces derniers on a cité plusieurs techniques de dépollution.

## **Chapitre II :étude des imperfections dues aux harmoniques**

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

Parmi les solutions de réduction des perturbations harmoniques de courant ou de tension, on peut les regrouper en deux familles : les filtres actifs et les filtres passifs.

### III.1. Filtrage actif [27]

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser.

#### III.1.1. Principaux types de filtres

Le filtre actif peut être à source de tension ou à source de courant dont les schémas généraux sont présentés aux figures (III.1 et III.2).

- ✓ Filtre actif à source de tension.

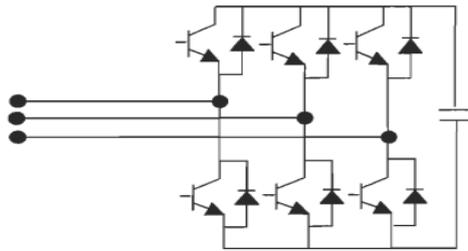


Fig III.1 : Convertisseur à source de tension

- ✓ Filtre actif à source de courant.

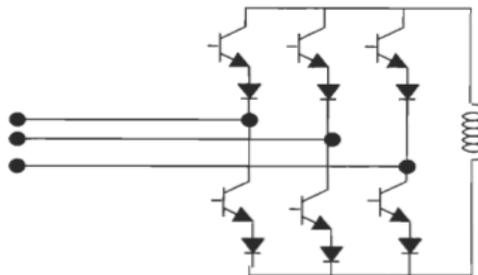


Fig III.2 : Modèle d'un convertisseur à source de courant.

Un système de filtrage pratique consiste en une combinaison d'un filtre actif et d'un filtre passe-haut de second ordre, une excellente performance de filtrage avec une faible fréquence de commutation.

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

Le filtre actif supprime les harmoniques de rangs faibles, pendant que le filtre passe haut s'occupe du filtrage des harmoniques de rangs élevés dans les courants de la charge.

### III.1.2.Principe de fonctionnement du filtre actif [17]

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance. Alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs.

Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau à fin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal.

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

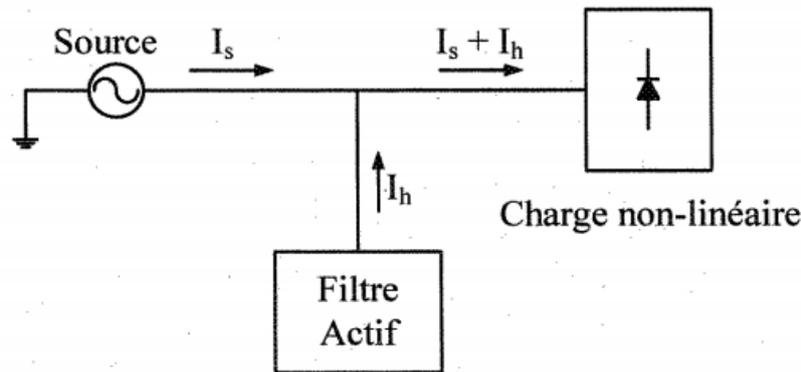


Fig III.3 :Principe de fonctionnement du filtre actif parallèle

Ou :  $I_s$ : Courant de source sinusoïdal (fondamental).

$I_h$  : Courants harmoniques.

### III.1.3.Classification des filtres actifs

Les filtres actifs peuvent être classifiés à partir du type de convertisseur qu'ils utilisent, de leur topologie ou encore de leur nombre de phases. Nous nous limiterons ici à la classification selon leurs différentes topologies. Suivant leurs topologies, les filtres actifs peuvent être en série, en parallèle ou mixtes (hybride).

#### III.1.3.1.Filtre actif série [29]

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau figure III.4. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux de tension, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

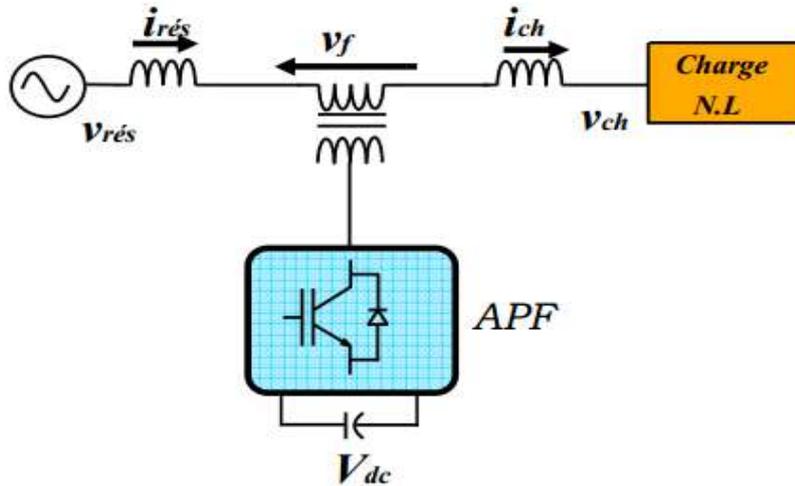


Fig III.4 :Filtre actif série

### III.1.3.2.Filtre actif parallèle [30]

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure III.5 est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant du côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du FAP consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés) produits par des charges polluantes de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

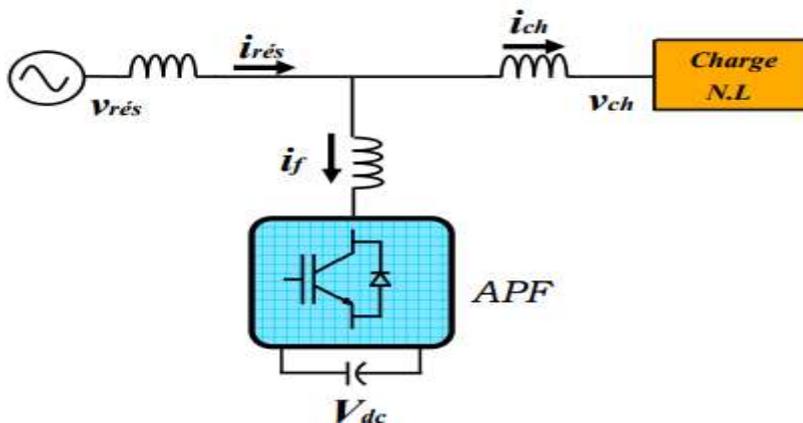


Fig III.5 :Filtre actif parallèle

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

### III.1.3.3. La combinaison parallèle-série Actifs (UPQC)

La figure III.6 schématise la configuration de la combinaison parallèle-série actifs qui s'appelle aussi (Unified Power Quality Conditionner UPQC), elle résulte de l'association des deux filtres actifs de puissance parallèle et série. Cette structure bénéficie des avantages de deux types de filtres actifs série et parallèle et elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale.

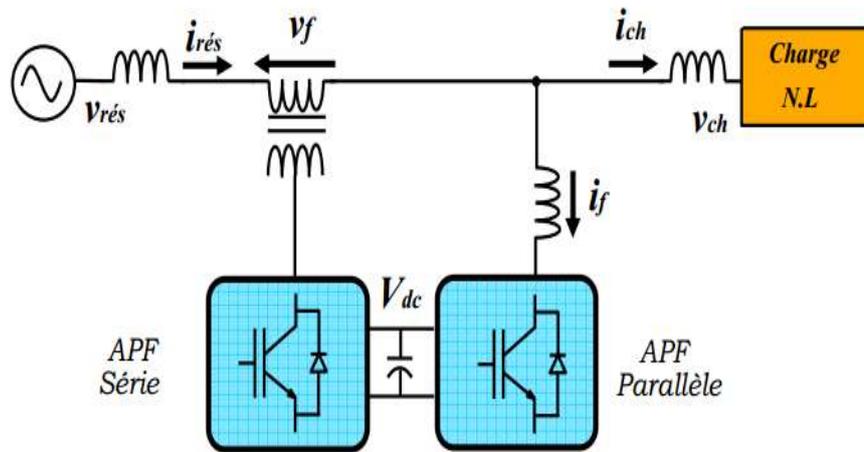


Fig III.6 : Combinaison parallèles-série des filtres actifs [28]

### III.1.2. Avantages et inconvénients des filtres actifs [27]

#### III.1.2.1. Les avantages des filtres actifs.

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- ✓ Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- ✓ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques.
- ✓ Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- ✓ Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

#### III.1.2.2. Les inconvénients des filtres actifs

Le filtrage actif présente quelques inconvénients :

- ✓ Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance.

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

- ✓ Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif.
- ✓ Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.

### III.1.3. Exemple d'application [32]

La figure III.7 montre un exemple typique de filtre actif parallèle réalisé à partir d'un onduleur de tension. Selon le mode de commande retenu, on pourra traiter uniquement les composantes harmoniques et/ou la puissance réactive. Dans cette application, l'onduleur doit d'abord absorber des courants compensant les courants harmoniques créés par le récepteur polluant. Pour cela, il est muni d'un contrôle de courant triphasé dont les consignes peuvent être élaborées par différence entre le courant instantané issu de ce récepteur et sa composante fondamentale.

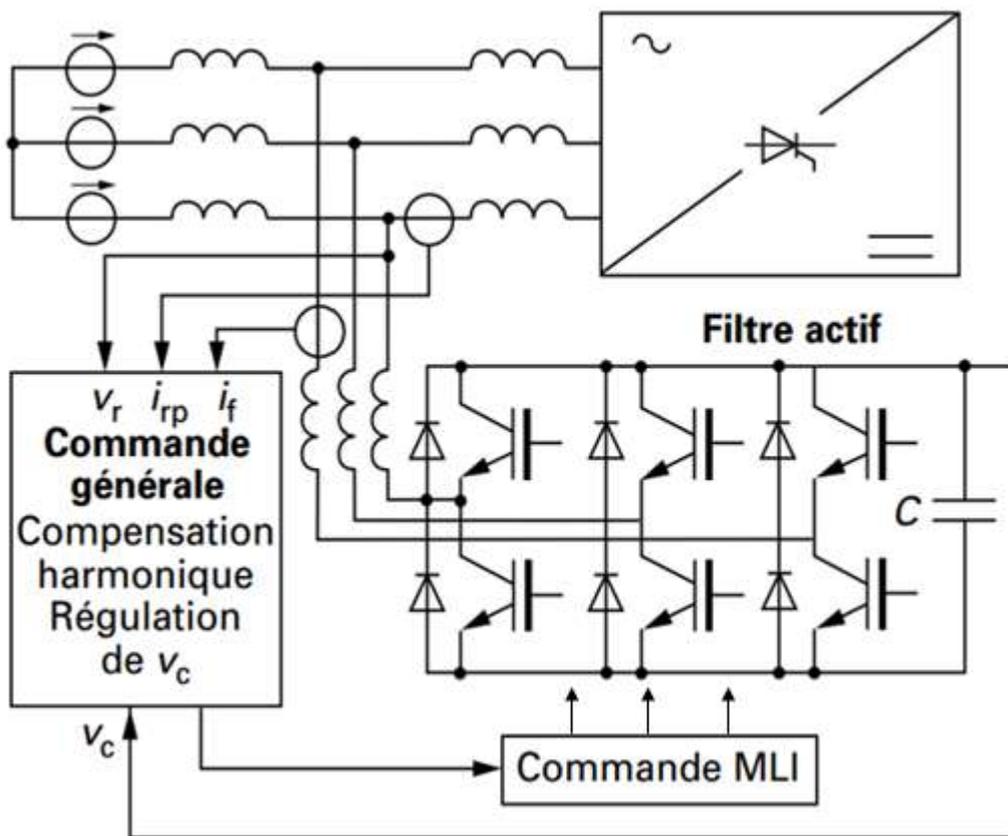


Fig III.7 : Structure d'un filtre actif parallèle

L'exemple très classique d'un récepteur polluant constitué par un redresseur à thyristor (en pont triphasé) est donné sur la (figure III.8).

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

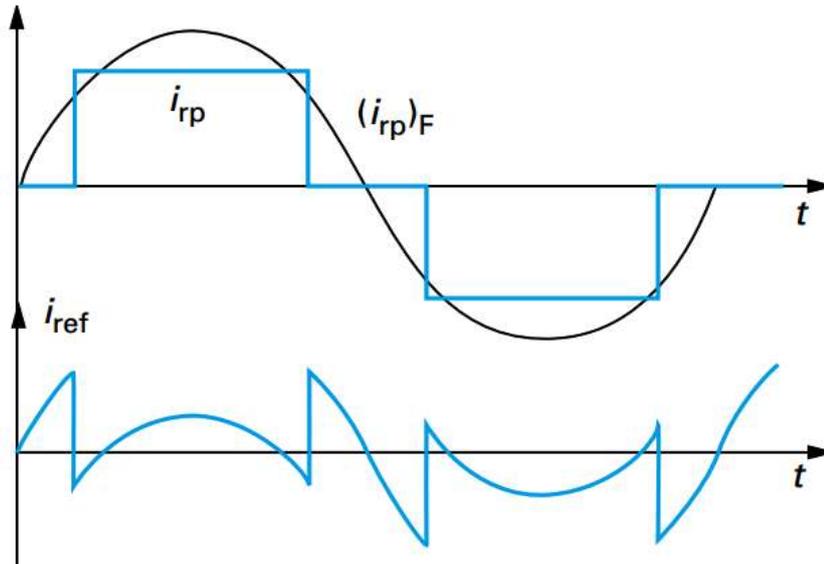


Fig III.8 : Exemple de compensation d'harmoniques

### III.2. filtrage passif

#### III.2.1. Principe de fonctionnement

Le principe du filtrage passif est de modifier localement l'impédance du réseau afin de faire dévier les courants harmoniques et, du même coup, éliminer les tensions harmoniques résultantes. Ces filtres sont composés d'éléments capacitifs et inductifs qui sont disposés de manière à obtenir une résonance série sur une fréquence déterminée. Afin de concevoir ce type de filtre, une connaissance précise des caractéristiques et du comportement du réseau sous l'effet des harmoniques est nécessaire. Une telle exigence de conception est généralement satisfaite à l'aide d'un logiciel de simulation. Les types de filtre passif utilisés sont choisis en fonction de l'atténuation harmonique recherchée.

#### III.2.2. Classification des filtres passifs

Il est possible de classer les filtres passifs selon leur emplacement sur le réseau, leur mode de connexion, leur degré d'amortissement de même que leur fréquence de résonance.

Les filtres passifs peuvent se diviser en deux familles, soit les filtres passifs parallèles, soit les filtres passifs séries. Selon le type choisi, les harmoniques peuvent être (a) littéralement bloqués par une impédance série élevée entre le convertisseur et le réseau, (b) déviés par une faible impédance en parallèle ou (c) une combinaison des deux.

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

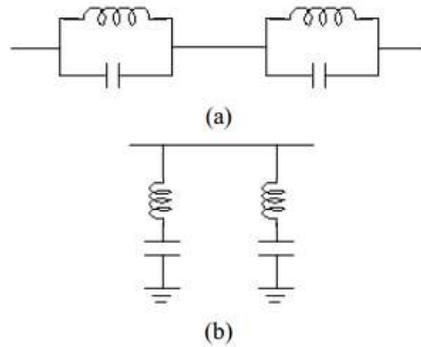


Figure III.9. (a) Filtre passif série, (b) Filtre passif parallèle

### III.2.2.1. Filtre passif parallèle

Le filtre passif parallèle est utilisé exclusivement du côté alternatif pour deux raisons :

1. Il porte uniquement le courant harmonique, il est lié à la terre.
2. À la fréquence fondamentale, il possède l'avantage de fournir la puissance réactive.

Pour une efficacité équivalente au filtre passif série, le filtre passif parallèle est beaucoup moins cher. Ce dernier est surtout utilisé dans le cas des charges génératrices de courants harmoniques alors que le filtre passif série est utilisé pour les charges génératrices de tensions harmoniques .

#### III.2.2.1.1. Types de filtre passif parallèles

##### III.2.2.1.1.1. Filtre passif résonant

Le filtre passif résonant montré dans la figure III.10 a pour caractéristique une impédance très faible à un courant harmonique de rang déterminé. Le facteur de qualité ( $Q$ ) détermine la précision du réglage de l'harmonique correspondant, ainsi que son efficacité à l'éliminer. Ce qui implique un facteur de qualité élevé pour ce type de filtre. Pour chaque rang d'harmoniques à filtrer, nous devons compter trois branches shunt (un filtre shunt pour chaque phase). Le filtre résonant fournit une partie de la puissance réactive au convertisseur par ses condensateurs.

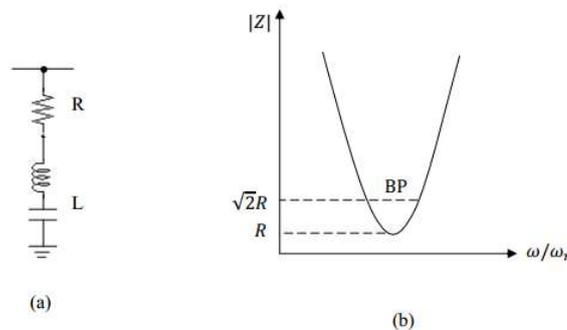


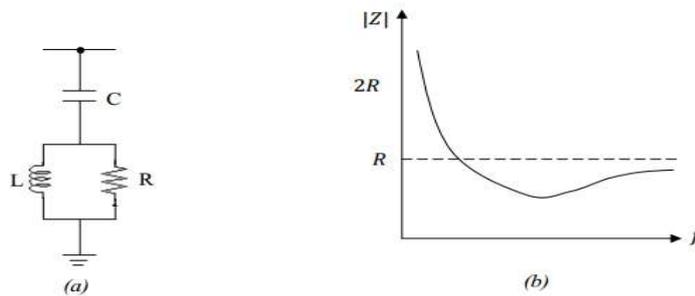
Figure III.10. (a) Filtre résonant parallèle, (b) Courbe de résonance

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

L'inconvénient de ce type de filtre passif est la variation des éléments C et L (due à leur vieillissement et à leur qualité). Ces facteurs ont pour effet de créer un désaccord de l'ensemble. Afin d'éliminer un rang harmonique particulier, un filtre résonant ajusté pour cette fréquence doit être installé sur chacune des trois phases. De plus, l'ajout de ce type de filtre peut causer des résonances parallèles avec l'impédance du réseau. Il y a également risque de résonance si deux filtres résonants ajustés à la même fréquence sont présents sur un même réseau. Il est donc particulièrement important d'avoir une bonne connaissance du comportement du réseau sous l'effet des harmoniques avant l'installation de ce type de filtre.

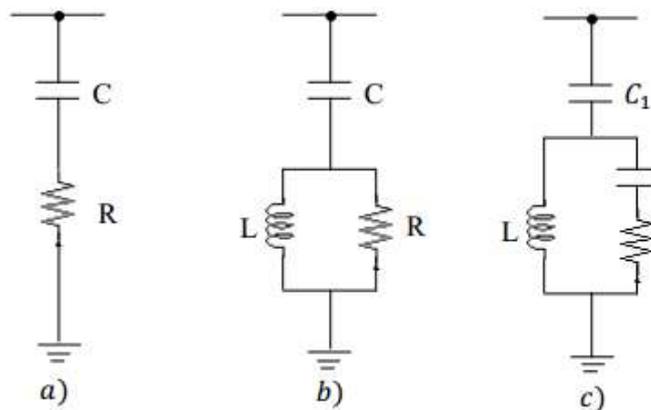
### III.2.2.1.1.2. Filtre passif amorti

Le filtre passif amorti est montré dans la figure III.8



**Figure III.11.**(a) Filtre amorti parallèle, (b) Courbe de résonance

D'après la figure III.12, on distingue trois types de filtre amorti, les filtres amortis de premier ordre (a), les filtres amortis de second ordre (b) et les filtres de troisième ordre (c).



**Figure III.12.** Types de filtre amorti

#### ➤ Avantages des filtres amortis

1. Leurs performances sont moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence, aux tolérances des composants

## Chapitre III : étude des filtres actifs et passifs

2. Ils présentent une faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquences harmoniques.

3. L'usage de multiples filtres résonants peut provoquer des résonances parallèles entre les filtres et l'admittance du réseau. Dans ce cas, l'usage d'un ou de plusieurs filtres amortis est préférable.

### ➤ Inconvénients des filtres amortis

1. Pour atteindre des performances similaires au filtre résonant, le filtre amorti doit être conçu pour un taux de puissance apparente ( $S$ ) élevé, bien que dans la plupart des cas de bonnes performances peuvent être obtenues avec la limite requise pour la compensation du facteur de puissance.

2. Les pertes dans la résistance sont généralement élevées.

Le filtre de premier ordre n'est pas très utilisé, car il exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Le filtre de second ordre fournit de meilleures performances de filtrage, mais avec des pertes plus élevées à la fréquence fondamentale que le filtre de troisième ordre. Ces deux derniers sont en général conçus avec un faible facteur de qualité  $Q$  compris entre (0,7 et 1,4). Le principal avantage du filtre amorti de troisième ordre sur le deuxième ordre est une réduction substantielle des pertes à la fréquence fondamentale en raison de l'impédance accrue à cette fréquence provoquée par la présence du condensateur  $C_2$ . De plus, la taille de  $C_2$  est petite comparativement  $C_1$ .

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :

1. Des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.

2. Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs > 11).

### III.2.3. Coût du filtre passif

Le coût d'un filtre (AC) est de l'ordre de 5 à 15 % du coût de tout l'équipement de la station de conversion (AC/DC). Il est réparti entre la puissance réactive que doit générer le filtre et le filtrage des harmoniques, mais sans base logique de la division. Le but est donc de concevoir un filtre à coût minimum qui filtre adéquatement et qui fournit une partie de la puissance réactive. Fait important à noter, la capacité représente environ 60 % du coût total du filtre. Avec ces données, une conception précise du filtre est bien justifiée.

### Conclusion

dans ce chapitre nous avons étudié les différents filtres existants. nous constatons que le filtrage passif est le plus simple et bien répandu.

## IV. Introduction

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de conversion d'énergie qui contient les organes suivants.

- Source d'énergie
- Convertisseur statique
- Charge réceptrice

Lorsque l'on connecte sur le réseau des convertisseurs statiques tels que les redresseurs, on est confronté à problème des harmoniques.

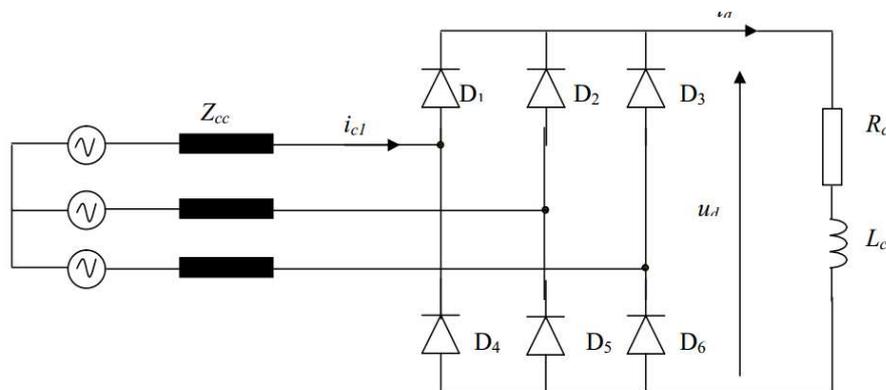
Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique, ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale la domaine de fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rang  $n=2$  et  $n=40$ ), il peut exister dans la tension des réseaux des sous harmoniques [35]

Ce chapitre est consacré à l'application de la technique de filtrage passif pour élimination des harmoniques pour une source de tension débitant sur un redresseur triphasé. La charge est un circuit RL.

### IV.1 Modélisation de l'association Source – filtre passif– Charge

Il s'agit de considérer le cas d'une source triphasée alimentant un redresseur pont triphasé à six diodes. Le pont triphasé de nature charge non linéaire alimente une charge RL.

La figure IV.1, montre le schéma de principe du circuit considéré.



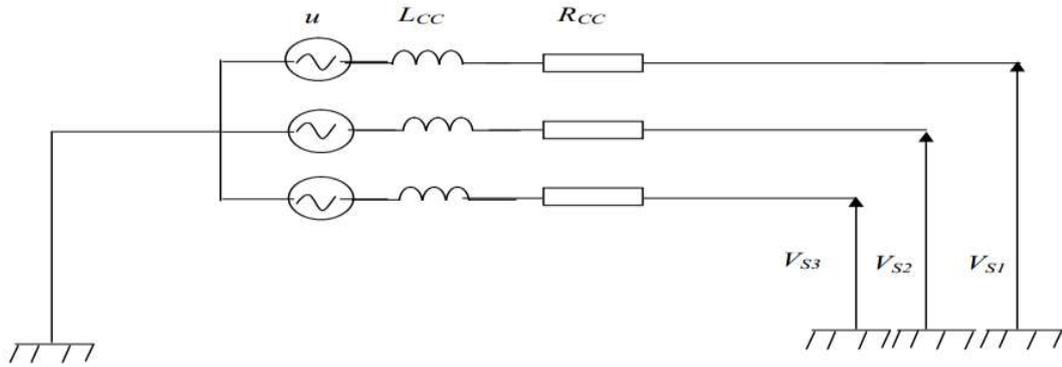
FigIV.1 Schéma de principe : source triphasée et une charge non linéaire

#### ❖ Modélisation du source

le réseau est représenté par une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit, d'où la représentation du réseau par un système de FEM triphasées équilibrées en série

avec une impédance (FigIV.2) [33,34]

chapitre V : technique de filtre passif pour réduire les harmoniques



FigIV.2 schéma Synoptique d'un réseau triphasé

$Z_{cc}$  : est une impédance dite de court circuit.

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega \text{ avec } R_{cc} = 0.01\Omega \text{ et } L_{cc} = 5.50\mu H \quad (4.1)$$

Il y a lieu de noter que le réseau est parfait (impédance négligeable) et le courant parfaitement lissé du côté continu.

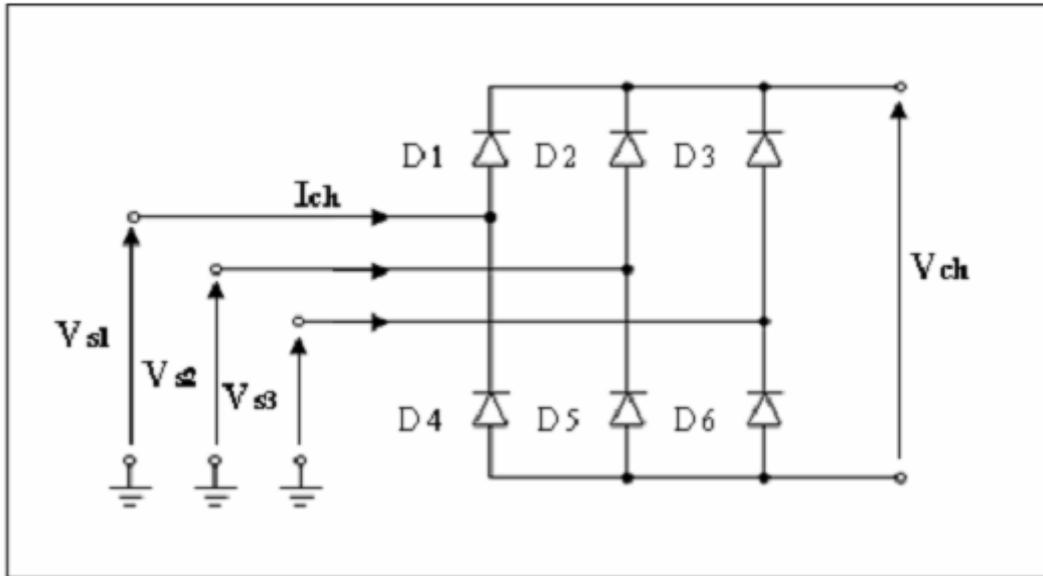
Notre réseau peut être modélisé par un système de tension direct, triphasé équilibré

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{sa} = U\sqrt{2} \sin(\omega t) \\ U_{sb} = U\sqrt{2} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ U_{sc} = U\sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{3\pi}{2}) \end{array} \right. \quad (4.2)$$

U : valeur efficace de la tension .

❖ **Modélisation de la charge**

Pour tester le filtre actif on opté pour une charge polluante qui est pont redresseur triphasé ,représenté sur la figure IV.3,ce dernier génère des harmoniques de courant de l'ordre  $6n \pm 1$  .cette charge est modélisé comme étant des source de courants parfaites(les semi conducteurs sont considérés parfaites)[33,34]



FigIV.3 Schéma synoptique d'un pont redresseur

#### Le filtre passif amorti à utiliser

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement .il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées . on utilise souvent pour filtrer simultanément les plus haute fréquence du spectre et non une fréquence particulière .c'est un filtre passe haut. [35]

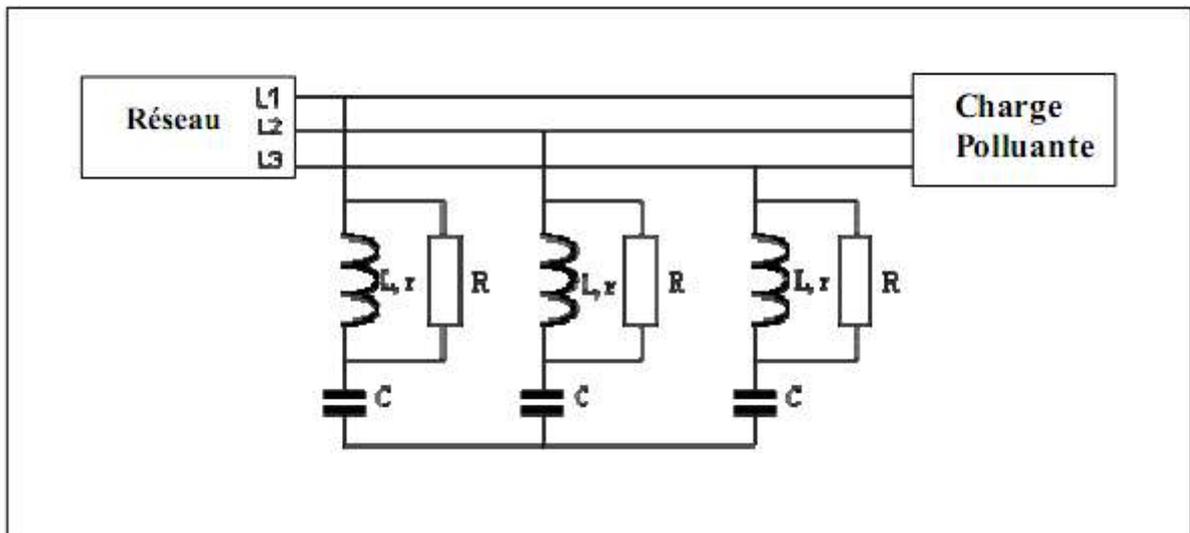


Figure IV.4 branchement d'un filtre amortie

## IV.2 Description globale de la simulation

Dans ce chapitre on se propose d'étudier la simulation de l'ensemble réseau, redresseur et filtre passif sous l'environnement **Matlab Simulink** avec lequel on met au point deux programmes de simulation( avant et après le filtrage).

Les valeurs des éléments caractérisant l'ensemble réseau filtre passif et charge polluante sont regroupées dans le tableau **IV.1**

<b>Source de tension</b>
$V=326,59$ , $f=50\text{Hz}$ , $R_{CC} = 0.01\Omega$ et $L_{CC} = 5.50\mu\text{H}$
<b>Charge polluante (redresseur)</b>
$R_d= 1\text{ m}\Omega$ , $L_d= 2\text{nH}$ , $R_c=100$ , $L_c=30\text{mH}$
<b>Filtre passif</b>
Filtre passe haut , $Q=5$ Kvar, $f=50\text{Hz}$

**Tab IV.1** les valeurs des éléments construisant la structure étudié

Les programmes de simulation développés, permettent de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et des tensions dans les différentes branches du circuit

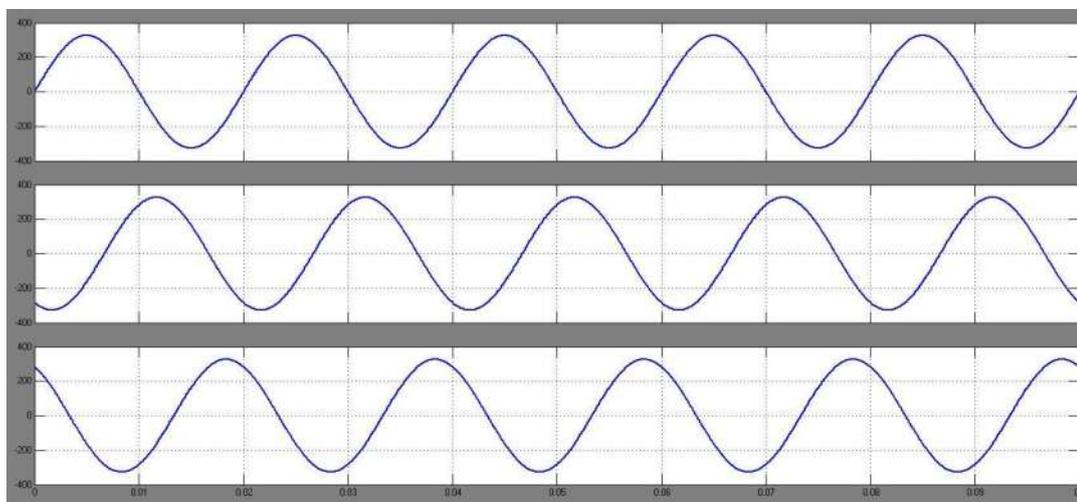
## IV.3 Résultats de simulation

Nous avons entrepris des essais de simulation pour charge non linéaire. Nous présentons leurs grandeurs, ainsi que les spectres harmoniques des courants.

La figure IV.5, présente les tensions de source. Elles sont purement sinusoïdales. Les figures

IV.6 présentent les courants de ligne, Ces derniers sont des formes presque rectangulaires donc contiennent des harmoniques.

Finalement, l'analyse fréquentielle illustrée par les figures IV.7 montre la présence, en plus de la fondamentale (rang 1), des harmoniques de rang. 5, 7, 11, 13, 17, 19 ...etc



FigIV.5 Tensions de source pour une charge non linéaire

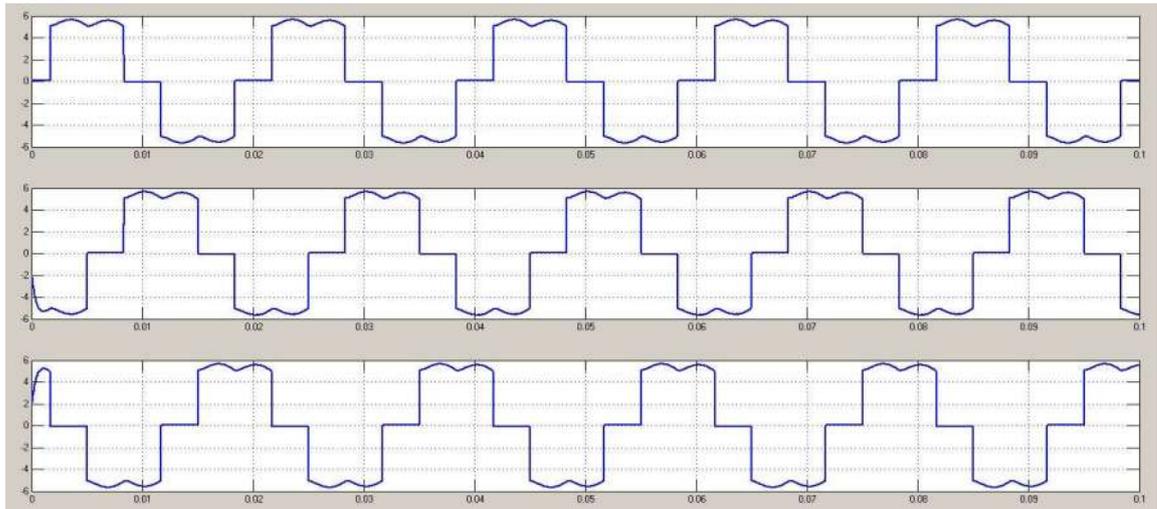
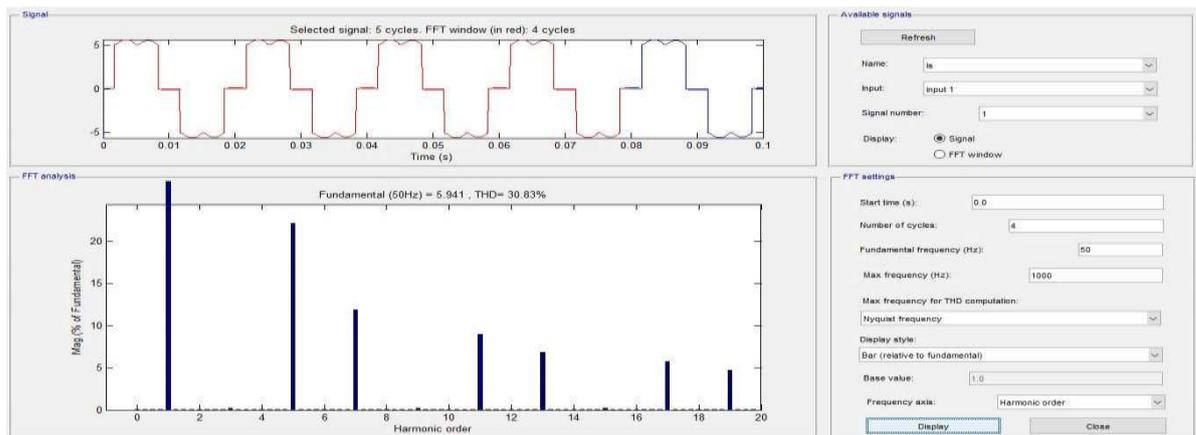


Fig IV.6 Courants de ligne pour une charge non linéaire



FigIV.7 Spectre harmoniques de courant de charge

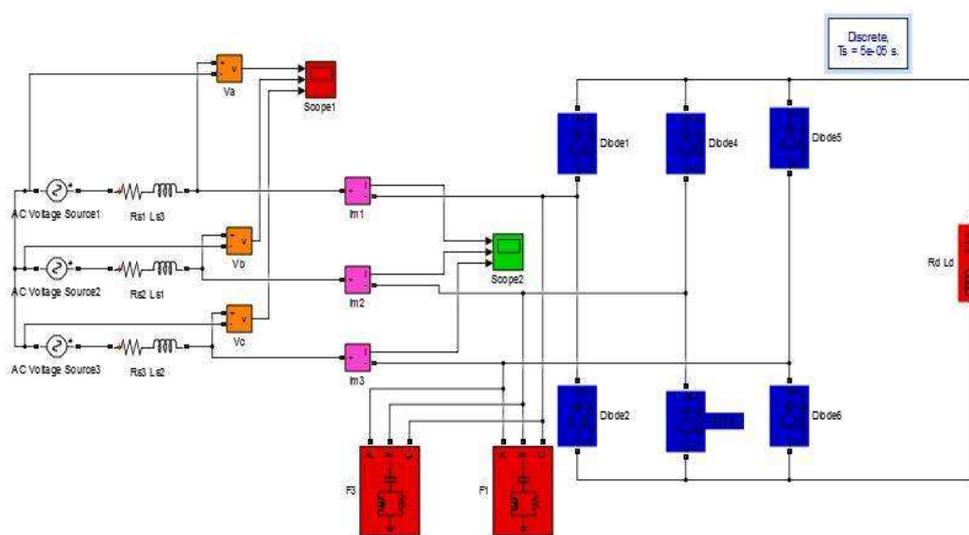
En conclusion, une charge non linéaire, constituée par un pont redresseur, génère les harmoniques de courant d'ordre  $6n \pm 1$  où  $n$  est le rang de l'harmonique ( $1, 2, 3, \dots, n$ ), et par conséquent absorbe du réseau une énergie réactive. Cependant, le courant de la charge  $i_c$  consommé par ce pont redresseur, peut être décomposé en série de Fourier, comme le décrit les équations suivantes :

$$i_{ca}(t) = I_1 \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \phi_1) + \sum_{n=1}^{\infty} [I_{6n-1} \cdot \sqrt{2} \sin((6n+1) \cdot (\omega t - \phi_{6n-1})) + I_{6n+1} \cdot \sqrt{2} \sin((6n+1) \cdot (\omega t - \phi_{6n+1}))] \quad (4.3)$$



## chapitre V : technique de filtre passif pour réduire les harmoniques

d'un filtre passif qui est mis en parallèle sur le réseau



**FigIV.8**schéma de principe d'une source triphasée et une charge non linéaire avec filtre

✓ Suivant la norme CIGREE.

$$THD(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (y_n)^2}}{y_1}$$

$$THD = 30,16 \%$$

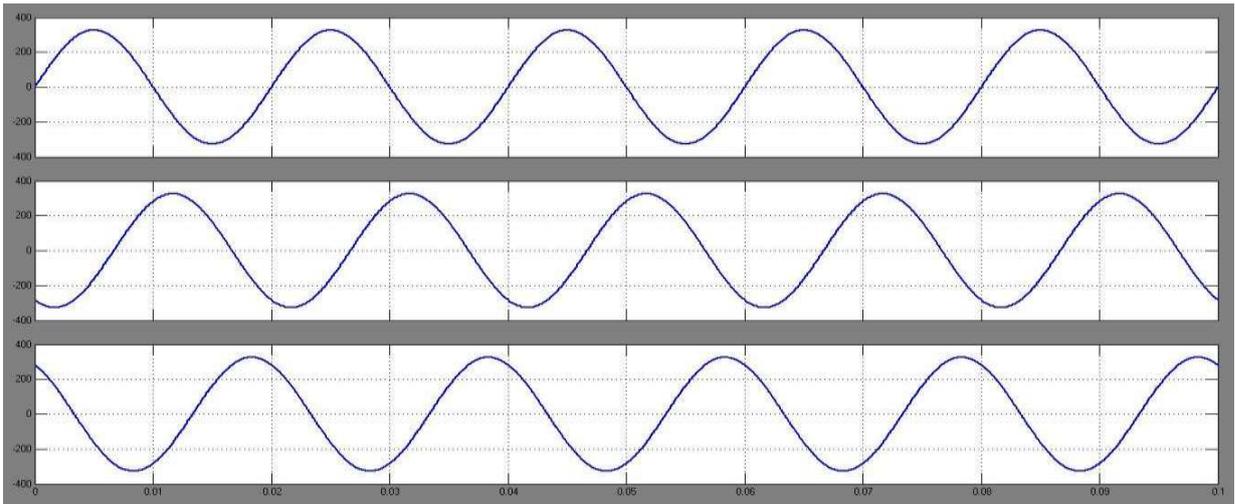
Le taux de distorsion harmonique individuelle  $H_n$  suivant la norme CIGREE  $H_n(\%) = 100 \frac{y_n}{y_1}$  est donné sur le (tableau IV.1) suivant

$K$	1	5	7	11	13	17	19
$H_n(\%)$	100	22	12	10	8	7	6

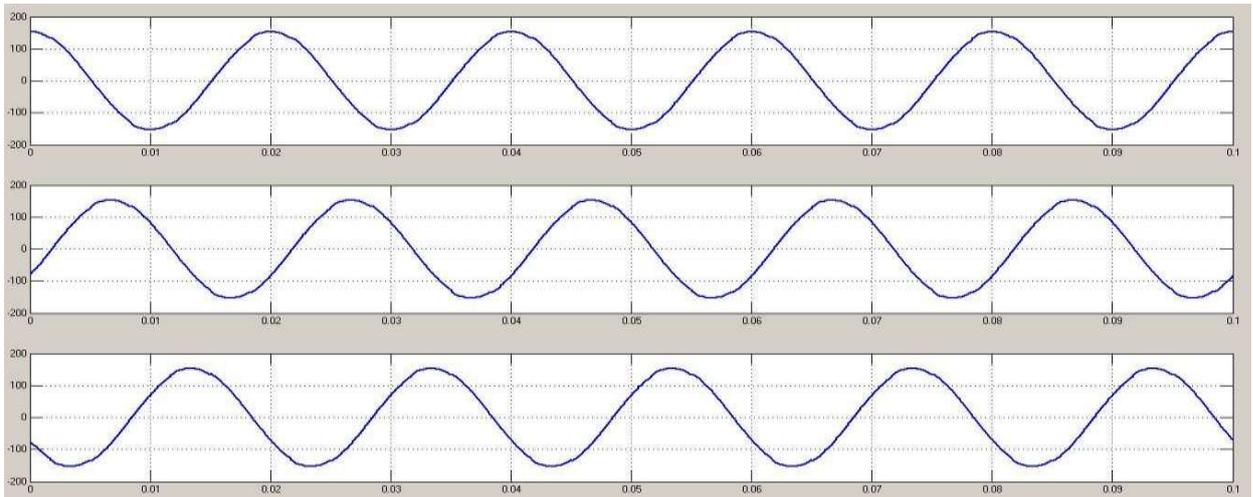
**Tab IV.2:**Le taux de distorsion harmoniques individuelles  $H_n$

La figure IV.9, présente les tensions de source. Elles sont aussi purement sinusoïdales la figure IV.10. présente les courants de ligne .Ces derniers sont des formes sinusoïdales donc ne contiennent pas des harmoniques Et la figure IV.11 montre l'efficacité et les bonnes performances du filtre passif amortie qui a réduit la THD à une valeur inferieur a 5 correspondant aux recommandations et normes internationales ainsi l'absence des harmoniques du courant de ligne après le filtrage.

**chapitre V : technique de filtre passif pour réduire les harmoniques**

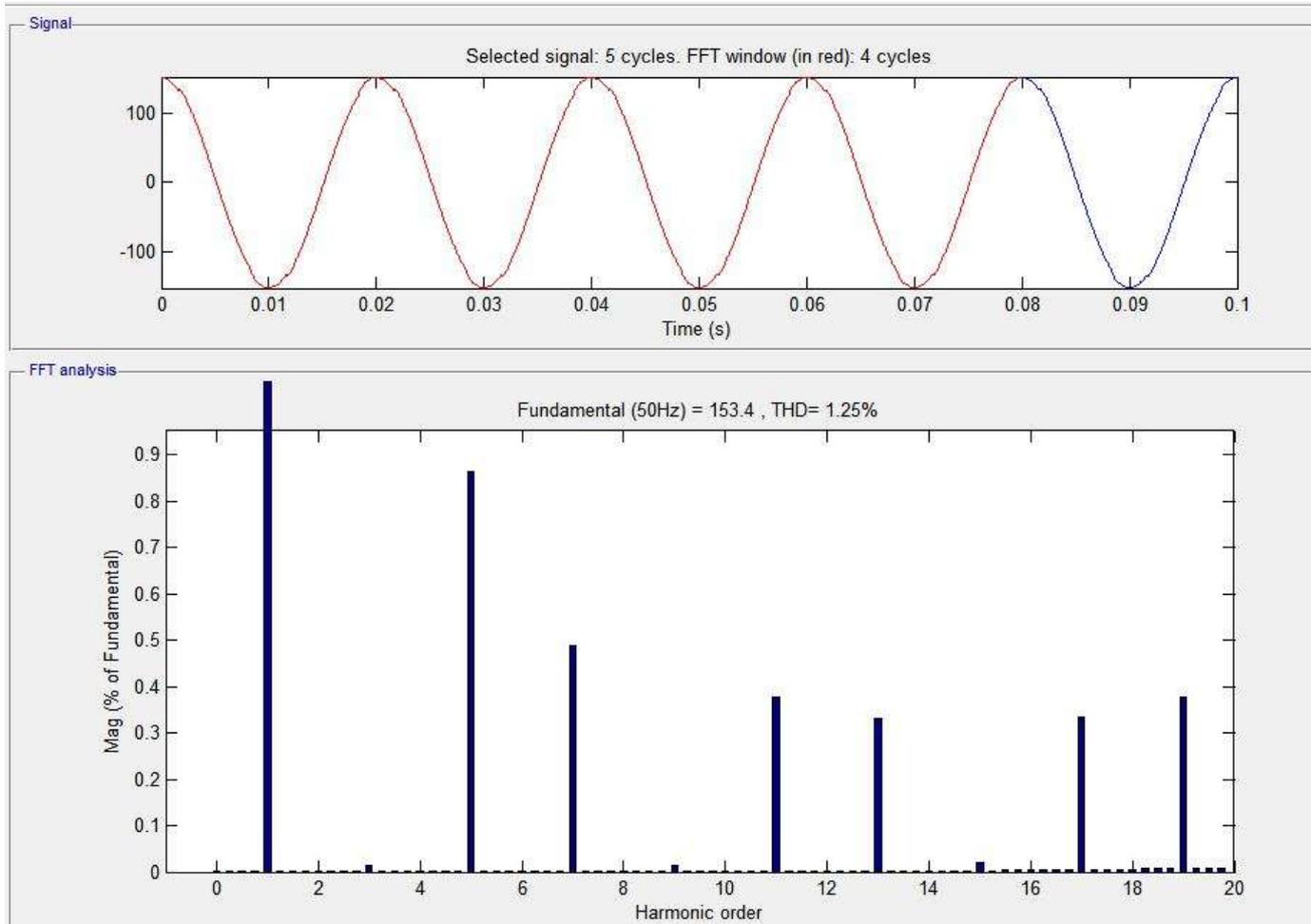


**figure V.9 les tensions de source d'une charge non linéaire avec filtre**



**figures IV.10 courants de ligne d'une charge non linéaire avec filtre**

## chapitre V : technique de filtre passif pour réduire les harmoniques



figures V.11 spectre des harmoniques du courant de ligne avec filtre

### conclusion

dans ce chapitre nous avons traité le filtre passif pour obtenir un énergie pure et éliminer définitivement le problème des harmoniques a laide d'un filtre passif qui est La solution la plus couramment de mise en œuvre .

sur les figure V.7 et figure V.9 sont comparés les spectres du courant injecté sur le réseau avant et après l'installation du filtre passif. Le filtre passif permet une reduction importante des harmoniques du courant.

## Conclusion générale

Ce travail est fait pour connaître les influences des harmoniques dans le réseau qui alimente les machines asynchrones et proposer des solutions pour améliorer la qualité de l'énergie et particulièrement compenser la pollution harmonique, et ses influences sur le réseau électrique.

Le premier chapitre a été consacré aux moteurs asynchrones et variateurs de vitesse.

À partir du deuxième chapitre de ce mémoire nous pouvons saisir l'importance de la problématique de la pollution harmonique, on a expliqué les perturbations harmoniques, leurs origines et leurs effets néfastes sur les matériels électriques.

Dans le troisième chapitre nous avons traité les différentes structures de filtres actifs et passifs et leur principe de fonctionnement de chaque filtre et prendre une charge non linéaire et faire la simulation en matlab pour éliminer le problème harmonique avec un filtre passif.

# BIBLIOGRAPHIE



- [1] MOHAMED MUSTAFA ABDUSALAM, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ». Thèse Doctorat Université Henri Poincaré, Nancy-I, 29/05/2008.
- [2] FORNEL BERNARD, «Alimentation des machines asynchrones ». Technique de l'ingénieur D 3 620.
- [3] GAUCHERON E, «Les moteurs électriques ... pour mieux les piloter et les protéger ». Cahier Technique Schneider Electric N° 207.
- [4] PIERRE MAYE, «Moteurs électriques industriels ». Edition DUNOD, paris, 2005.
- [5] MERLIN.G, SOUARE.D, «Les techniques de commande du moteur asynchrone ».Le magazine Schneider de l'enseignement technologique et professionnel, 06/1998.
- [6] GUY SEGUIER, «Electronique de puissance : les fonctions de base et leurs principales applications », DUNOD, 7<sup>ième</sup> Edition, Paris, 1999.
- [7] MAX MARTY et DANIEL DIXNEUF, «Principe d'électrotechnique : cours et exercices corrigés ». DUNOD, Paris, 2005.
- [8] «Réducteurs ». Catalogue SEW USOCOME, 06/1010.
- [9] «L'essentiel sur les variateurs de vitesse ».Danfoss Drive A/S, 1<sup>ière</sup> Edition, 3<sup>ième</sup> tirage, 1999.
- [10] SCHONEX.Jet NEBON.Y, «Protections BT et variateurs de vitesse (convertisseurs de fréquence) ». Cahier Technique Schneider Electric N° 204.
- [11] «Variateurs de vitesse Altivar 31 ». Schneider Electric, Catalogue,10/2003.
- [12] «MOVIDRIVE MDX 60B/61B ».Catalogue SEW USOCOME, 06/2007.
- [13] SEYED-HAMID SHAHALAMI, «Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable». Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 06/10/2001.
- [14] CHALAH SAMIRA, «Analyse stochastique de la résultante de l'injection de courants harmoniques dans un réseau électrique ». Mémoire de magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 17/05/2012.
- [15] ABDELMALEK BOULAHIA, «Etude des convertisseurs statiques destinés à la qualité de l'énergie électrique ».Mémoire magister Université de Constantine, 28/04/2009.

## Bibliographie

- [16] T.DEFLANDRE et MAURAS.P, «les harmoniques sur les réseaux électriques ».Edition Eyrolles 61Bd saint, Paris 5<sup>e</sup>, 1998.
- [17]BEAULIEU.S, «Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ». Mémoire maîtrise en ingénierie Université du Québec à Chicoutimi, 05/2007.
- [18] MAXIME MOREAU, «Modélisation haute fréquence des convertisseurs d'énergie. Application à l'étude des émissions conduites vers le réseau ». Thèse Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 07/12/2009.
- [19] «Guide de conception des réseaux électriques industriels », Cahier Technique Schneider Electric T&D 6 883 427/A.
- [20]SCHONEK.J, «Les singularités de l'harmonique 3 », Cahier Technique Schneider Electric N°202.
- [21] ANGELO BAGGINI et JAN DESMET, «Dimensionnement du conducteur de neutre dans les installations riches en harmoniques ». Guide Power Quality.
- [22] COLLOMBET.C,M.LUPIN.J et SCHONEK.J,«Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ». Cahier Technique Schneider Electric N°152.
- [23] BETTEGA.E et FIORINA.J-N,«Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs ». Cahier Technique Schneider Electric N°183.
- [24] BENCHIKH BACHIR, « Pollution harmonique, effets et remèdes ». Mémoire ingénieur Université Bejaia, 2006.
- [25] «Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle ». Thèse Maitrise en Génie Electrique, Université du Québec, 17/09/2007.
- [26]DAVID CHAPMAN, «Harmoniques causes et effets ». Guide Power Quality.
- [27] RECHKA.S, «Etude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution ». Mémoire de maître es science appliquées en génie électrique Université du Québec à Trois- Rivières, 04/2002.
- [28] CHAOUI.A, «Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ». Thèse Doctorat, Université de Sétif, 05/10/2010.
- [29]ABDESLAM.D, «Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension». Thèse Doctorat Université e de Haute-Alsace, 08/12/ 2009.

## Bibliographie

- [30] BELHAOUCHET.N, «Fonctionnement à fréquence de commutation constante des convertisseurs de puissance en utilisant des techniques de commande avancées Application : Amélioration de la qualité de l'énergie». Thèse Doctorat Université Ferhat Abbas Sétif, 06/07/2011.
- [31] MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI, «Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension». Thèse Doctorat Université Louis Pasteur – Strasbourg, 12/09/2002.
- [32] FOCH.H, FOREST.F, MEYNARD.T, «Onduleurs de tension : Structures. Principes. Applications» Techniques de l'ingénieur, traité Génie électrique D 3 176.
- [33] «filtrage actif des harmoniques des réseaux électriques» ,thèse de magister de l'université de Batna 2005
- [34] «Etude et réalisation d'un filtre actif parallèle commandé par logique floue» thèse de magister de l'école militaire polytechnique, 9 janvier 2009
- [35] «les harmoniques sur le réseau électrique» Directin des études et recherche en France – Edition EYROLLES – 1989