

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE DE M'SILA  
FACULTE DE TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE  
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU  
DIPLOME  
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE  
SPECIALITE: AUTOMATIQUE**

**THEME**

---

**IDENTIFICATION DES COURANTS HARMONIQUES POUR LES  
CHARGES NON-LINEAIRES EQUILIBREES  
ET DESEQUILIBREES**

---

**Proposé et dirigé par :**

**Dr. Tarak BENSLIMANE**

**Présenté par :**

**Ahlam GUERBAS**

**Année Universitaire: 2011/2012**

**N° d'ordre:10**

# *Remerciement*

*J'adresse mon remerciements premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il a donnée durant toutes ces longues années d'études..*

*Je remercie monsieur BENSLIMANE TARAK pour sa collaboration ; ainsi que pour son aide constant et précieux, Il a présenté un excellent exemple de la compétence scientifique, discipline et générosité.*

*Je remercie également tous les membres de jury d'avoir accepter de juger notre travail.*

*Merci aussi pour tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration du présent travail.*

*Pour finir, merci du fonds de cœur à ma familles, exceptionnellement mess parents,mes grands parents pour leurs soutiens.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, merci pour tous les sacrifices consentis afin de me permettre d'être ce que je suis ; Je leur exprime humblement ma profonde gratitude et mon attachement éternel.*

*À mes grands parents qui me sont les plus chers*

*À mes chers frères : Amine, Ismail, Adham*

*Et sœurs : Karima, Isra, Fatima*

*À toute ma famille, surtout : Warda, Rebiha, Fahima, Mbarek, Wissam, Zakaria, Salim et Djamila*

*À mes chères amies surtout : Hadjer, Fatiha, Soumia*

*À toute la promotion 2012 de l'électrotechnique*

*G. Ahlam*

# Sommaire

Sommaire.....	I
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des symboles.....	VII
Introduction générale.....	1

## Chapitre I :

### **Théorie sur les harmoniques et le déséquilibre des courants triphasés**

I.1 Introduction.....	3
I.2 Pollution harmonique .....	3
I.2.1 Caractéristiques de l'onde de tension et de courant.....	4
I.2.1.1 Valeurs efficaces.....	5
I.2.1.2 La puissance apparente transitée .....	5
I.2.1.3 Les puissances active et réactive transitées.....	5
I.2.1.4 Facteur de puissance.....	6
I.2.1.5 Valeur efficace de la tension et du courant.....	6
I.2.1.6 Puissance active et réactive.....	6
I.2.1.7 Facteur de puissance.....	7
I.2.2 Effets de la pollution harmonique.....	7
I.2.2.1 Effets instantanés .....	7
I.2.2.2 Effets différés.....	8
I.2.3 Caractéristiques de la pollution harmonique.....	8

I.2.3.1 Le facteur de distorsion harmonique .....	8
I.2.3.2 Le facteur de distorsion.....	8
I.2.4 Norme et réglementation.....	9
I.3 Notions sur le déséquilibre.....	10
I.3.1 Définition.....	10
I.3.2 Origine du déséquilibre.....	10
I.3.3 Taux de déséquilibre.....	10
I.3.3.1 Taux de déséquilibre des amplitudes.....	10
I.3.3.2 Taux de déséquilibre à base des composantes symétriques.....	11
I.3.4 Effets du déséquilibre.....	12
I.3.5 Normes.....	12
I.4 Conclusion.....	12

## **Chapitre II :**

### **Méthodes d'identification des courants harmoniques**

II.1 Introduction à la stratégie d'identification.....	14
II.2 Classification des méthodes d'identification des courants perturbateurs.....	14
II.3 Méthodes d'identification considérées.....	15
II.3.1 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....	15
II.3.2 Méthode de référentiel synchrone (SRF: synchronous reference frame).....	19
II.3.3 Algorithme de la moyenne de la somme des puissances monophasées.....	21
II.3.4 Méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée).....	23
II.4 Conclusion.....	25

## Chapitre III :

### Résultats de simulation

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>26</b>
<b>III.2 Application des différentes méthodes d'identification.....</b>	<b>26</b>
<b>III.2.1 Charge triphasée non-linéaire équilibrée.....</b>	<b>26</b>
<b>III.2.1.1 Méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées.....</b>	<b>27</b>
<b>III.2.1.2 Méthode trigonométrique (tri-monophasée).....</b>	<b>29</b>
<b>III.2.1.3 Méthode de référentiel synchrone.....</b>	<b>30</b>
<b>III.2.1.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....</b>	<b>32</b>
<b>III.2.2 Charge triphasée non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>34</b>
<b>III.2.2.1 Méthode de la moyenne de la somme des puissances Monophasées.....</b>	<b>35</b>
<b>III.2.1.2 Méthode trigonométrique (tri-monophasée).....</b>	<b>37</b>
<b>III.2.1.3 Méthode de référentiel synchrone.....</b>	<b>38</b>
<b>III.2.1.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....</b>	<b>40</b>
<b>III.3 Conclusion.....</b>	<b>43</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>44</b>
<b>Annexe.....</b>	<b>45</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>46</b>

# Liste des figures

## Chapitre I :

### Théorie sur les harmoniques et le déséquilibre des courants triphasés

**Fig. I.1 Exemple de déséquilibre des amplitudes.....10**

## Chapitre II :

### Méthodes d'identification des courants harmoniques

**Fig. II.1 Schéma représentant le principe de séparation des puissances.....17**

**Fig. II.2 Schéma de principe de l'identification par la méthode des puissances  
réelle et imaginaire instantanées.....19**

**Fig. II.3 Schéma représentant le principe de séparation des composantes continues  
 $I_{dc}$  et  $I_{qc}$  de celles pulsatoires (harmoniques)  $I_{dh}$  et  $I_{qh}$ ..... 20**

**Fig. II.4 Schéma de principe de l'identification par la méthode de référentiel  
synchrone.....21**

**Fig. II.5 Algorithme d'extraction du fondamental par la méthode tri-monophasée.....23**

## Chapitre III :

### Résultats de simulation

**Fig. III.1 Tension triphasée du réseau électrique et courant triphasé de la charge  
non-linéaire équilibrée.....26**

**Fig. III.2 Puissances instantanées monophasées, leur somme et la valeur  
moyenne de leur somme.....27**

**Fig III.3 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés  
par la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées...28**

<b>Fig III.4 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés par la méthode trigonométrique.....</b>	<b>29</b>
<b>Fig III.5 Courants de charge dans le repère (d – q), leurs valeurs moyennes et composantes harmoniques dans le repère (dq).....</b>	<b>30</b>
<b>Fig III.6 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode de référentiel synchrone.....</b>	<b>31</b>
<b>Fig III.7 Tensions de phase du réseau électrique et courant de charge triphasée dans le repère de Concordia, puissance active et sa valeur moyenne et puissance imaginaire.....</b>	<b>32</b>
<b>Fig III.8 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....</b>	<b>33</b>
<b>Fig. III.9 Tension triphasée du réseau électrique et courant triphasé de la charge non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>34</b>
<b>Fig. III.10 Puissances instantanées monophasées, leur somme et la valeur moyenne de leur somme pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>35</b>
<b>Fig III.11 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés par la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>36</b>
<b>Fig III.12 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés par la méthode trigonométrique pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>37</b>
<b>Fig III.13 Courants de charge dans le repère (d – q), leurs valeurs moyennes et composantes harmoniques dans le repère (d – q) pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>38</b>
<b>Fig III.14 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode de référentiel synchrone pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée .....</b>	<b>39</b>
<b>Fig III.15 Tensions de phases du réseau électrique et courant de charge triphasée dans le repère de Concordia, puissance active et sa valeur moyenne et puissance imaginaire pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>40</b>
<b>Fig III.16 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée.....</b>	<b>41</b>

# Liste des tableaux

## Chapitre I :

### **Théorie sur les harmoniques et le déséquilibre des courants triphasés**

**Tab. I.1 Principales charges polluantes.....4**

**Tab. I.2 Limitation des courants harmoniques édictée par EDF.....9**

## Chapitre III :

### **Résultats de simulation**

**Tab. III.1 Caractéristiques des méthodes d'identification des courants  
harmoniques triphasés.....42**

## Liste des symboles

THD : Taux de distorsion harmonique.

Fdis : Taux de distorsion.

F : Facteur de puissance.

P,Q : Puissance active et réactive.

S : Puissance apparente.

D : Puissance déformante.

$V_0, I_0$  : Séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

$\bar{p}, \bar{q}$  : Puissance continue liée aux composantes fondamentales des courant triphasé .

$\tilde{p}, \tilde{q}$  : des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant triphasé .

$I_d, I_q$  : Courants de charge dans le plan (d,q).

$I_{c1}, I_{c2}, I_{c3}$  : Courants de la charge polluante (redresseur à diode).

$V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}$  : Tensions du réseau.

$I_\alpha, I_\beta$  : Courants de charge dans le plan ( $\alpha,\beta$ ).

$V_\alpha, V_\beta$  : Tensions du réseau dans le plan ( $\alpha,\beta$ ).

p , q : Puissances active et réactive instantanées dans le plan ( $\alpha,\beta$ ).

$I_{\alpha h}, I_{\beta h}$  : Courants harmoniques dans le plan ( $\alpha,\beta$ ).

$I_{c1h}, I_{c2h}, I_{c3h}$  : Courants harmoniques dans le plan (a,b,c).

$I_{c1f}, I_{c2f}, I_{c3f}$  : Courants fondamentaux dans le plan (a,b,c).

# INTRODUCTION GENERALE

# Introduction générale

L'utilisation croissante dans l'industrie de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ainsi, on assiste à une augmentation régulière, de la part des utilisateurs, des taux d'harmonique et de déséquilibre des courants, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique.

Les équipements industriels et domestiques utilisent de plus en plus de circuits électroniques ayant un comportement non-linéaire. Ils engendrent, dans les réseaux de distribution, des courants non-sinusoïdaux pouvant être équilibrés ou déséquilibrés provoquant des effets nocifs.

La compensation active des courants harmoniques est une des approches récemment développées dans le domaine de qualité d'énergie. Elle est basée sur l'identification du courant harmonique et l'injection d'un courant de la même forme mais en opposition de phase.

L'identification des courants harmoniques doit être en temps réel et précise quelque soit le type charge. Dans la littérature, différentes méthodes d'identification de courant perturbateur sont étudiées [1-10].

Dans ce mémoire, on s'intéresse à l'application de quatre méthodes, vu leur précision, rapidité et facilité d'implantation, pour l'identification des perturbations harmoniques équilibrés et déséquilibrés de courant dans un système triphasé. Ces méthodes sont [1-10] :

- Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées,
- Méthode de référentiel synchrone,
- Méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées,
- Méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée).

Dans cet objectif, ce mémoire sera divisé en trois chapitres :

- Ø Dans le premier, on débute avec la problématique des harmoniques, leurs origines, leurs conséquences et la réglementation. Ensuite, on présente des notions sur le

courant triphasé déséquilibré, les effets de cette perturbation ainsi que la norme éditée à son égard.

- Ø Dans le second chapitre de ce mémoire, nous traitons différentes méthodes d'identification des courants harmoniques équilibrés et déséquilibrés dans le domaine fréquentiel et temporel. Nous montrons leurs avantages et limites et nous retenons les méthodes pour générer le courant de référence pour le filtre de premier ordre.
- Ø Dans le troisième chapitre on applique les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques équilibrés et déséquilibrés telles que la méthode de la moyenne des puissances monophasées, la méthode trigonométrique, la méthode de synchronisme et la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées. Enfin, les résultats des simulations sont présentés et discutés.

# **Chapitre I**

## **Théorie sur les harmoniques et le déséquilibre des courants triphasés**

## I.1 Introduction

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes.

Il apparaît évident que la qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de livraison. Cette tension subit généralement des perturbations de trois origines distinctes :

- ∅ les perturbations de tension causées par le passage dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques.
- ∅ les perturbations de tension causées par des harmoniques et les creux de tension.
- ∅ Le déséquilibre des tensions ou des courants dus à la présence des charges déséquilibrées ou non linéaires [11].

Les courants perturbateurs comme les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive sont majoritairement émis par des charges non linéaires, à base d'électronique de puissance, et/ou déséquilibrées. La puissance réactive peut être aussi consommée par des charges linéaires inductives comme les moteurs asynchrones qui sont largement présents dans les sites industriels [11].

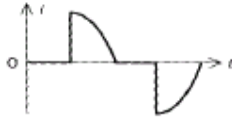
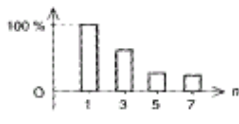

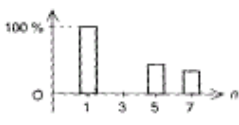
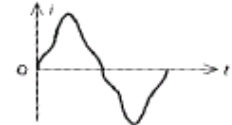
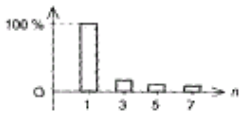
Dans ce chapitre, nous présenterons des notions sur les harmoniques des courants et le déséquilibre des courants triphasés ainsi que leurs origines, leurs impacts et la norme émise dans ce contexte.

## I.2 Pollution harmonique

C'est l'altération de la forme d'onde sinusoïdale de courant et/ou de la tension engendrée par certaines charges électriques dites charges non-linéaires présentées dans le tableau (I-1). Ce genre de signal, à supposer que la périodicité du signal ne soit pas atteinte, peut être décomposé en une somme de sinusoïdes de fréquence ( $n.f$ ) tel que  $n \in \mathbb{N}$  et  $f$  est la fréquence du signal.

Pour  $n=1$  la sinusoïde est dite fondamentale.

Pour  $n>1$  les sinusoïdes sont dites harmoniques d'ordre supérieur.

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

**Tab. I.1 Principales charges polluantes [1]**

Le signal peut éventuellement contenir une grandeur continue qui représente sa valeur moyenne. Cette décomposition est connue sous le nom de la décomposition en série de Fourier.

Dans le cas où la tension et le courant seraient non- sinusoïdaux, ils peuvent être mis sous la forme donnée respectivement par les relations (1-1) et (1-2) [12].

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \sqrt{2} \sin(n \cdot \omega \cdot t - \alpha_n) \quad (I-1)$$

$$i(t) = \sum_{m=1}^{\infty} I_m \sqrt{2} \sin(m \cdot \omega \cdot t - \beta_m) \quad (I-2)$$

$\alpha_n$  : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre n.

$\beta_m$  : Phase initiale du courant harmonique d'ordre n .

## I.2.1 Caractéristiques de l'onde de tension et de courant [1-3]

### I.2.1.1 Valeurs efficaces

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont données respectivement par les équations (1-3) et (1-4)

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (\text{I-3})$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I-4})$$

### I.2.1.2 La puissance apparente transitée

La puissance apparente est la puissance disponible, son expression est donnée par l'équation (1-5).

$$S = V \cdot I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I-5})$$

### I.2.1.3 Les puissances active et réactive transitées

La puissance active est la puissance qui se transforme en travail, elle est mesurée en Watts, son expression est donnée par l'équation (1-6).

$$P = \frac{1}{T} \int_T v(t) \cdot i(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos(\varphi_h) \quad (\text{I-6})$$

$$\varphi_h = \alpha_h - \beta_h \quad (\text{I-7})$$

$\alpha_h$  : phase initiale de la tension harmonique d'ordre h.

$\beta_h$  : phase initiale du courant harmonique d'ordre h.

$\varphi_h$  : déphasage de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h

La puissance réactive est une puissance qui est absorbée au réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par l'équation (1-8).

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\varphi_h) \quad (\text{I-8})$$

La puissance déformante est donnée par (1-9).

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \cdot \sum_{\substack{h=1 \\ n \neq h}}^{\infty} I_h^2 \quad (\text{I-9})$$

Tél que :

n: ordre d'harmonique de la tension

h: ordre d'harmonique du courant

Cette puissance est véhiculée par les tensions et les courants harmoniques de rangs distincts, elle est dite puissance déformante et notée D.

#### I.2.1.4 Facteur de puissance

$$F = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h}} \quad (\text{I-10})$$

Pour une meilleure compréhension, nous allons mettre en évidence quelques effets des harmoniques dans le cas où la tension resterait sinusoïdale.

#### I.2.1.5 Valeur efficace de la tension et du courant

$$v(t) = V_1 \sqrt{2} \sin(\omega.t - \alpha_1) \quad (\text{I-11})$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sqrt{2} \sin(h.\omega.t - \beta_h) \quad \varphi_1 = \alpha_1 - \beta_1 \quad (\text{I-12})$$

#### I.2.1.6 Puissance active et réactive

$$P = V_1 I_1 \cos(\varphi_1) \quad (\text{I-13})$$

$$Q = V_1 I_1 \sin(\varphi_1) \quad (\text{I-14})$$

### I.2.1.7 Facteur de puissance

$$F = \frac{P}{S} = \frac{V_1 I_1 \cos(\varphi_1)}{V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} = \cos(\varphi_1) \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{D^2}{P^2 + Q^2}}} \quad (I-15)$$

- Ø De (1-12), nous pouvons conclure que les courants harmoniques accroissent la valeur efficace, donc il aura une augmentation des pertes par effet Joule.
- Ø Les composantes harmoniques véhiculent une puissance harmonique dite déformante, parce qu'elle est créée par les harmoniques et que ces derniers déforment l'onde sinusoïdale, cette puissance est de nature réactive car les composantes harmoniques ne contribuent pas à la production de la puissance active.
- Ø De (1-15), nous pouvons aisément voir que  $F_{dis}$  est inférieur à 1, les harmoniques réduisent le facteur de puissance donc réduisent la puissance disponible.

### I.2.2 Effets de la pollution harmonique

Parmi les effets engendrés par les harmoniques, nous pouvons distinguer deux types [1], [4-5] :

#### I.2.2.1 Effets instantanés

Ce sont des effets immédiats, ils se manifestent en même temps que l'apparition des harmoniques.

- Ø Réduction du facteur de puissance (gaspillage d'énergie).
- Ø Augmentation des pertes par effet joule (accroissement du courant efficace).
- Ø Perturbation des réseaux de télécommunication.
- Ø Dysfonctionnement des appareils électroniques (altération du signal de sortie, dégradation de la qualité de d'image des écrans des micro-ordinateurs et des téléviseurs).
- Ø Perturbation des systèmes de régulation et de synchronisation (les harmoniques peuvent faire varier l'instant de passage par zéro, par exemple).

- Ø Dégradation de la classe de précision des appareils de mesures.
- Ø Provocation de phénomène de résonance et d'anti-résonance.
- Ø Déclenchement intempestif des disjoncteurs.

### I.2.2.2 Effets différés

Ce sont des effets qui apparaissent suite à une exposition prolongée à des courants harmoniques.

- Ø Vieillesse accélérée des composants et des isolants par échauffement (l'impact dépend de la constante thermique de chaque élément).
- Ø Raccourcissement de la longévité des appareils (usure des machines tournantes sous l'effet des couples pulsatoires, par exemple).
- Ø Surcharge du neutre [11].

### I.2.3 Caractéristiques de la pollution harmonique [1-3]

Nous considérons le cas où la tension au point de raccordement est sinusoïdale.

#### I.2.3.1 Le facteur de distorsion harmonique

Le facteur de distorsion noté TDH nous donne une idée sur l'ampleur de la pollution harmonique, il est défini par l'équation (1-16) [11].

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (I-16)$$

Le THD vaut zéro pour une onde ayant une forme sinusoïdale, devient plus en plus grand que l'onde se déforme, c'est à dire que les harmoniques deviennent importants.

#### I.2.3.2 Le facteur de distorsion

Le facteur de distorsion noté  $F_{dis}$  donné par l'équation (1-17) nous renseignent sur la puissance déformante engendrée par les harmoniques, voir l'équation (1-18) [11].

$$F_{dis} = \frac{I_1}{I} \quad (I-17)$$

$$D = S \cdot \sqrt{1 - (F_{dis})^2} \quad (I-18)$$

### I.2.4 Norme et réglementation

Dans le but :

- ∅ D'épargner à l'utilisateur de l'énergie électrique, les désagréments engendrés par la présence des harmoniques.
- ∅ D'assurer la longévité et la sécurité des différents équipements constituant le réseau et ceux qui sont branchés à ce dernier.

Des normes fixant un seuil d'injection harmonique maximale à ne pas dépasser, ces normes ont été édictés par différents organismes, ils peuvent être soit nationaux, notamment UTE-CEF (Union Technique de l'Electricité – Comité Electrotechnique Français), régionaux, notamment le CENELEC (Comité de normalisation Electrotechnique) en Europe ou internationaux, notamment CEI (Comité Electrotechnique International). Il arrive que des entreprises éditent leurs propres règles, notamment EDF en France. Les règles de limitation des courants harmoniques recommandées aux clients par EDF sont données dans le tableau ci-dessous [1] [5-6] [11]:

Rangs impaires	$I_h / I_1$ (%)	Rangs paires	$I_h / I_1$ (%)
3	4	2	2
5 et 7	5	4	1
9	2	>4	0,5
11 et 13	3		
>13	2		

**Tab. I.2 Limitation des courants harmoniques édictée par EDF**

Les limitations en tension harmonique que les clients de EDF doivent respecter sont :

∅ Pour un harmonique pair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 0.6 \%$ .

∅ Pour un harmonique impair :  $\frac{V_h}{V_1} \leq 1 \%$ .

∅ Pour le taux de distorsion global de tension :  $THD \leq 1.6 \%$ .

Concernant la puissance réactive, EDF autorise ses clients à en consommer, sans être facturés, jusqu'à 40% de la puissance active absorbée. Cela se traduit, pour des charges linéaires, par un facteur de puissance ( $\cos(\varphi) \geq 0,928$ ) ou par un angle de phase ( $(\varphi) \leq 21,8^\circ$ ) [11].

### I.3 Notions sur le déséquilibre

#### I.3.1 Définition

Un système de triphasé de courant est dit déséquilibré lorsqu'au moins l'une de ses courants diffère des deux autres en amplitude et/ou lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$  [11].

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois courants n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$  [13].

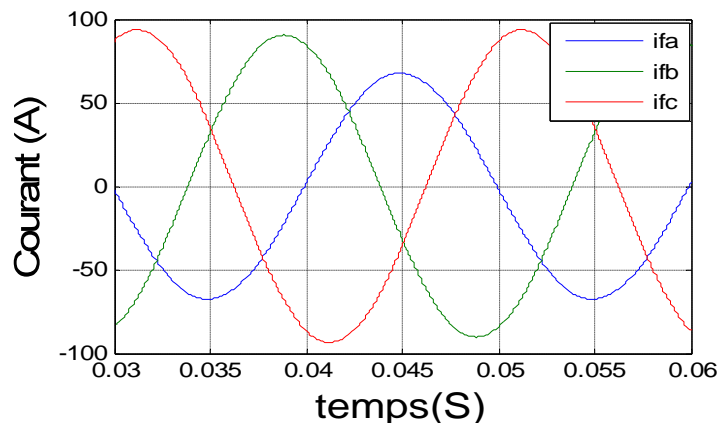


Fig. I.1 Exemple de déséquilibre des amplitudes

#### I.3.2 Origine du déséquilibre

Le déséquilibre est généralement dû à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois courants. Autrement dit, le déséquilibre du courant triphasé est dû à des charges triphasées asymétriques (non-symétrique) [14].

#### I.3.3 Taux de déséquilibre

##### I.3.3.1 Taux de déséquilibre des amplitudes

Ce taux se calcule comme suit [15] :

$$\tau_i \% = \frac{|\max [(I_a - I_{moy}), (I_b - I_{moy}), (I_c - I_{moy})]|}{I_{moy}} \cdot 100 \quad (I-19)$$

$$I_{moy} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} \quad (I-20)$$

Tel que :

$\tau_i$  = le taux de déséquilibre du courant.

$I_{moy}$  = la valeur moyenne des amplitudes des courants des trois phases.

$I_a, I_b, I_c$  : les amplitudes des courants des trois phases.

### I.3.3.2 Taux de déséquilibre à base des composantes symétriques

Les composantes symétriques ont été proposées pour la première fois par C. L. Fortescue en 1918, qui est devenue une référence pour l'étude du déséquilibre. Cette méthode consiste à décomposer le système déséquilibré en trois systèmes équilibrés : un système direct, un inverse, et un homopolaire [16].

La transformation des grandeurs réelles en composantes symétriques est donnée par matrice de Fortescue.

$$\begin{bmatrix} I_p \\ I_n \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{LA} \\ I_{LB} \\ I_{LC} \end{bmatrix} \quad \text{Où } a = e^{j2\pi/3} \quad (I-21)$$

$$[ I_{p,n,o} ] = [F] * [ I_{a,b,c} ] \quad \text{avec } [F] = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (I-22)$$

$I_p$ : composante directe du courant.

$I_n$  : composante inverse du courant.

$I_o$  : la composante homopolaire du courant.

Ainsi, une nouvelle définition est donnée au déséquilibre, suivant la composante inverse ou homopolaire.

Le pourcentage du déséquilibre de la composante inverse est [16]:

$$\tau_{if} \% = \frac{(\text{la composante inverse})}{(\text{la composante directe})} \quad (I-23)$$

### I.3.4 Effets du déséquilibre

Les courants déséquilibrés engendrent des chutes de tension inégales aux bornes de l'impédance de ligne ; ce qui induit le déséquilibre des tensions d'alimentation.

Dans ce cas, les effets se manifestent par l'accroissement de l'échauffement dans la phase où circule le courant de plus élevé conduira à un vieillissement prématuré des bobinages et aussi par la production d'un couple antagoniste conduisant à une dégradation des performances et à un vieillissement accéléré des isolants (déséquilibre permanent de 5% réduit de 30% la durée de vie d'une machine asynchrone) [11].

Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau basse tension qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

Concernant les charges triphasées déséquilibrées à neutre isolé. La somme des courants instantanés des phases est toujours nulle. Le déséquilibre des ces charges peut accroître le courant dans l'une phase conduisant à son suréchauffement [17].

### I.3.5 Normes

ANSI /IEEE définir le déséquilibre du courant par :

$$\tau_i \% = \frac{|I_{max} - I_{moy}|}{I_{max}} \cdot 100, \text{ telle que ce pourcentage ne dépassé pas } 5\% \text{ [18].}$$

## I.4 Conclusion

La forte croissance de l'utilisation de convertisseurs générateurs d'harmoniques et de déséquilibré qui rentrent dans plusieurs applications demeure le souci inquiétant des distributeurs et des utilisateurs d'énergie électrique. Car ce type de charge dit non-linéaire équilibrés ou déséquilibrés engendre dans le réseau de distribution, des courants non-sinusoidaux équilibrés ou déséquilibrés provoquant des perturbations envahissant ce dernier. Ces perturbations se répercutent sur la qualité de l'énergie électrique et sur le bon fonctionnement des installations. Elles se manifestent de deux manières différentes (effets instantanés, effets diffères).

Dans ce chapitre, on a présenté le phénomène des harmoniques et le déséquilibre du courant triphasé, leurs caractéristiques, leurs effets ainsi que les normes de tolérance.

Dans le chapitre qui va suivre, nous allons présenter les méthodes les plus utilisées pour l'identification des courants harmoniques dans les cas de charges équilibrées et déséquilibrées.

# **Chapitre II**

## **Méthodes d'identification des courants harmoniques**

## II.1 Introduction à la stratégie d'identification

L'identification des courants perturbateurs dans le domaine temporel peut être fait à partir :

- ∅ du courant de la charge polluante.
- ∅ du courant de la source.

La première méthode est la plus utilisée dans le domaine de la compensation des courants perturbateurs causés par les charges polluantes. Cette méthode sera employée dans ce mémoire.

## II.2 Classification des méthodes d'identification des courants perturbateurs

Les différentes méthodes d'identification du courant perturbateur, peuvent être regroupées en deux familles [6].

- ∅ La première utilise la transformée de Fourier, rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul.
- ∅ La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant totale.

Récemment, des nouvelles méthodes d'identification ont été présentées pour donner le choix de compenser un, plusieurs ou voir même tous les types de courants perturbateurs [19]. Parmi celles-ci on a choisi quatre méthodes à étudier:

- Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées,
- Méthode de repère de référence synchronisé,
- Méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées,
- Méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée).

## II.3 Méthodes d'identification considérées

### II.3.1 Principe du fonctionnement de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées [20] [21]

Cette méthode se distingue par sa simplicité de mise en œuvre, les courants de références sont calculés seulement en fonction des courants absorbés par la charge polluante et la tension aux points de raccordement et elle s'adapte à toute variation de courant qui survient soit suite à une variation de charge ou un défaut. Elle est basée sur le calcul de la puissance réelle et imaginaire instantanée ; chacune d'elle étant constituée d'une composante constante créée par les fondamentaux de courants et une composante ondulée créée par les courants harmoniques. Aussi la séparation de ces deux composantes permet de générer soit les courants fondamentaux ou les courants harmoniques.

Cette méthode exploite la transformation  $\alpha - \beta$  pour obtenir les puissances réelle et imaginaire. Notons par  $(V_\alpha, V_\beta)$  et  $(I_\alpha, I_\beta)$  les composantes orthogonales du repère  $\alpha - \beta$  associées respectivement aux tensions du réseau électrique ( $V_s$ ) et aux courants absorbés par les charges polluantes ( $I_s$ ). La transformation  $\alpha - \beta - 0$  triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante [1], [6-10] :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-1})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-2})$$

Les composantes avec l'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension. La puissance active instantanée, notée  $P(t)$ , est définie par la relation suivante :

$$\begin{cases} P(t) = V_{s1} I_{c1} + V_{s2} I_{c2} + V_{s3} I_{c3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) = V_{\alpha} I_{\alpha} + V_{\beta} I_{\beta} \\ p_0(t) = V_0 I_0 \end{cases} \quad (\text{II-3})$$

Avec  $p(t)$  la puissance réelle instantanée,  $p_0(t)$  la puissance homopolaire instantanée.

L'avantage de la transformation  $\alpha - \beta - 0$  est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension.

Pour un système triphasé équilibré en tension, comme le notre,  $V_0=0$  et pour un système triphasé équilibré en courant (ou système à trois fils (sans fil neutre)) comme le notre,  $I_0 = 0$ .

De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Q(t) = q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2}) I_{c3} + (V_{s2} - V_{s3}) I_{c1} + (V_{s3} - V_{s1}) I_{c2}] = V_{\alpha} I_{\beta} - V_{\beta} I_{\alpha} \quad (\text{II-4})$$

La puissance  $q$  a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le volt-ampère imaginaire (VAI).

A partir des relations (II-3) et (II-4), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II-5})$$

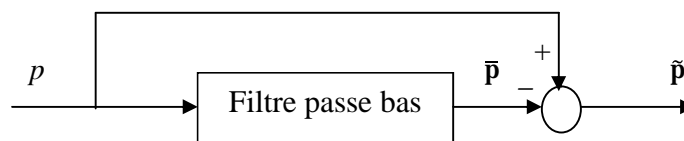
Dans le cas général, chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

- $\bar{p}$  une puissance continue liée aux composantes fondamentales actives du courant et de la tension,
- $\bar{q}$  une puissance continue liée aux composantes fondamentales réactives du courant et de la tension ( $\bar{q}=0$  car on a considéré le redresseur triphasé PD3 à diodes comme charge non-linéaire (tension et courant en phase)),
- $\tilde{p}$  et  $\tilde{q}$  des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, un filtre passe-bas chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles est utilisé. Un circuit constitué d'un filtre passe-bas avec un soustracteur peut être employé pour l'extraction de la puissance  $\tilde{p}$ , comme le présente la Figure II.1.



**Fig. II.1 Schéma représentant le principe de séparation des puissances**

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du premier ordre. La relation suivante donne l'expression générale de la fonction de transfert d'un filtre passe-bas du premier ordre :

$$H(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \quad (\text{II-7})$$

Avec la constante de temps du filtre exprimé en fonction de la pulsation de coupure ( $\omega_c$ ) et de la fréquence de coupure ( $f_c$ ) par la relation suivante:  $\tau = \frac{1}{\omega_c} = \frac{1}{2\pi f_c}$

La fréquence de coupure,  $f_c = \omega_c / 2\pi$ , est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées ( $\tilde{p}$ ). Elle doit aussi permettre aussi le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale ( $\bar{p}$ ).

Une fois la puissance perturbatrice ( $\tilde{p}$ ) calculée, on calcule les courants harmoniques dans le repère de Concordia suivant la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha h} \\ I_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II-8})$$

Les courants harmoniques (perturbateurs) triphasés identifiés, sont calculés à partir de la transformation de Concordia inverse donnée par la relation (II.9) :

$$\begin{bmatrix} I_{c1h} \\ I_{c2h} \\ I_{c3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha h} \\ I_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

Dans cette figure II.2, nous avons présenté le schéma de l'algorithme d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, qui est constitués essentiellement, par des blocs de la matrice de transformation ( $\alpha$ - $\beta$ ), des filtres afin d'enlever les composantes continue des puissances, et les différents blocs de calcul du courant harmonique.



$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{c1} \\ I_{c2} \\ I_{c3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

En exploitant les signaux  $\cos(\hat{\theta})$  et  $\sin(\hat{\theta})$  tirés de la tension " fondamentale " du réseau, nous obtenons l'expression des courants dans le système d-q tournant à la pulsation de la composante fondamentale de la tension du réseau :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad (\text{II-11})$$

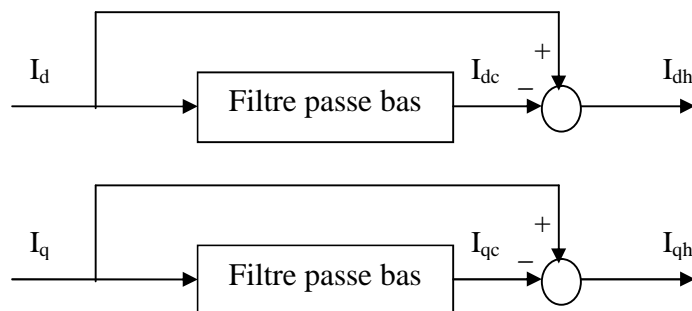
Soit

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \quad (\text{II-12})$$

Où

- $I_{dc}$  et  $I_{qc}$  sont des composantes continues issues de la transformation de Park des composantes fondamentales des courants  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ,  $I_{c3}$ .
- $I_{dh}$  et  $I_{qh}$  sont des composantes pulsatoires issues de la transformation de Park des composantes harmoniques des courants  $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ,  $I_{c3}$ .

La séparation des composantes continues  $I_{dc}$  et  $I_{qc}$  de celles pulsatoires (harmoniques)  $I_{dh}$  et  $I_{qh}$  se fait par moyen d'un filtre passe-bas.



**Fig. II.3 Schéma représentant le principe de séparation des composantes continues  $I_{dc}$  et  $I_{qc}$  de celles pulsatoires (harmoniques)  $I_{dh}$  et  $I_{qh}$**

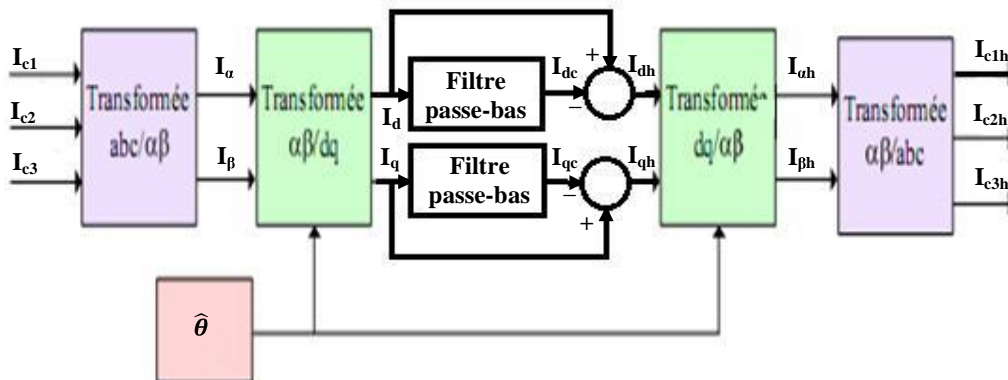
Les composantes harmoniques dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  se calculent par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{\alpha h} \\ I_{\beta h} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & -\cos(\hat{\theta}) \\ \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \\ -\cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dh} \\ I_{qh} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{II-13})$$

La transformation inverse de Concordia permet de remonter aux courants harmoniques (équilibrés ou déséquilibrés) :

$$\begin{bmatrix} I_{c1h} \\ I_{c2h} \\ I_{c3h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha h} \\ I_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (\text{II-14})$$

L'algorithme de d'identification des courants harmoniques par la méthode de référentiel synchrone est schématisé dans la figure II.4.



**Fig. II.4 Schéma de principe de l'identification par la méthode de référentiel synchrone**

### II.3.3 Algorithme de la moyenne de la somme des puissances monophasées

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé ( $V_{s1}$ ,  $V_{s2}$ ,  $V_{s3}$ ) et ( $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ,  $I_{c3}$ ), la puissance active peut être exprimée par [19] :

$$\begin{aligned}
 P &= p_1 + p_2 + p_3 = V_{s1} I_{c1} + V_{s2} I_{c2} + V_{s3} I_{c3} \\
 &= p_{1c} + p_{1h} + p_{2c} + p_{2h} + p_{3c} + p_{3h}
 \end{aligned}
 \tag{II-15}$$

Où

$$p_i = p_{ic} + p_{ih} \quad i = 1, 2, 3.$$

$p_i$  : Puissance instantanée monophasée (par phase)

$p_{ic}$  : Composante continue de la puissance monophasée

$p_{ih}$  : Composante harmonique de la puissance monophasée (elle est pulsatoire)

Ø Pour charge équilibrée :

$$p_{1c} = p_{2c} = p_{3c} = p_c \quad \text{et} \quad p_{tot} = (p_{1c} + p_{2c} + p_{3c}) = 3 p_c \tag{II-16}$$

$p_{tot}$  : la somme des puissances monophasées

Ø Pour charge déséquilibrée :

$$p_{1c} \neq p_{2c} \neq p_{3c} \quad \text{et} \quad p_{tot} = (p_{1c} + p_{2c} + p_{3c}) \tag{II-17}$$

$p_{tot}$  : la somme des puissances monophasées

Une fois calculées, les puissances monophasées équilibrées ou déséquilibrées ( $p_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ) sont sommées pour extraire, via un filtre passe-bas, la valeur moyenne ( $p_{moy}$ ) de leur somme ( $p_{tot}$ ).

Les composantes fondamentales des courants de phase ( $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$ ,  $I_{c3}$ ) sont calculées par l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{c1f} \\ I_{c2f} \\ I_{c3f} \end{bmatrix} = \frac{p_{moy}}{V_{s1}^2 + V_{s2}^2 + V_{s3}^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix}
 \tag{II-18}$$

Les composantes harmoniques équilibrés ou déséquilibrés des courants triphasés sont déduites comme suit :

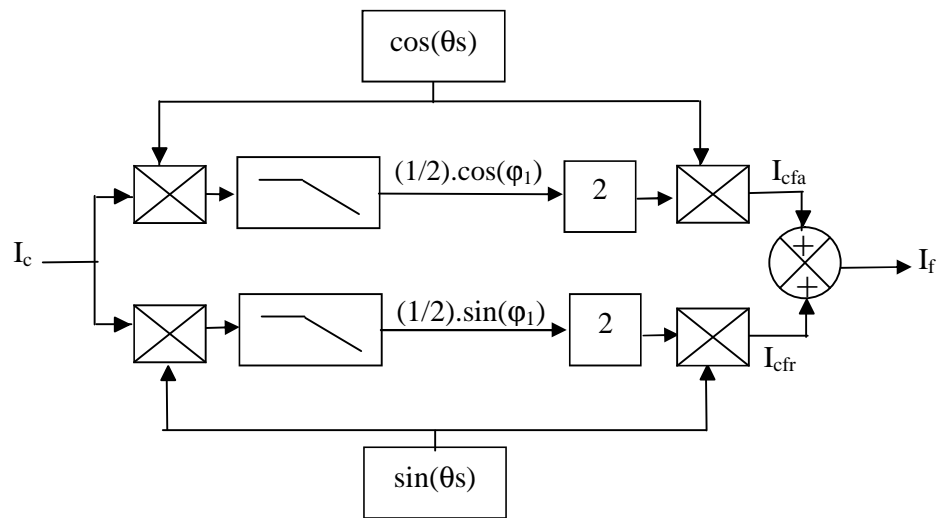
$$I_{cih} = I_{ci} - I_{cif} \quad i = 1, 2, 3 \tag{II-19}$$

**II.3.4 Méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée) [23-25]**

Cette méthode est basée sur la génération de deux fonctions trigonométriques  $\cos(2\pi f t)$  et  $\sin(2\pi f t)$  où (f) est la fréquence de pré-reconnue de la tension du réseau électrique. Ces deux fonction associée au courant de charge ( $I_{c1}$ ,  $I_{c2}$  et  $I_{c3}$ ) pour l'extraction des composantes fondamentales de ces courants.

Cette méthode identifie le courant sur chaque phase, elle est basée sur l'estimation sur chaque phase de la composante active  $I_{cfa}$  et réactive  $I_{cfr}$  du fondamental courant, ce qui nous permet de régénérer ce dernier, aussi pour retrouver le courant harmonique généré par la charge une simple soustraction suffit.

La figure II.5 montre l'algorithme d'extraction du fondamental par la méthode tri-monophasée



**Fig. II.5 Algorithme d'extraction du fondamental par la méthode tri-monophasée**

Nous présenterons l'identification des courants harmoniques sur la première phase, l'identification se fait de la même manière pour les autres phases, le courant absorbé par une charge non linéaire quelconque peut se mettre sous la forme :

$$I_{c1}(\theta_s) = \sum_1^{\infty} I_{ch} \sin(h\theta_s - \phi_h) = I_{c1} \sin(\theta_s - \phi_1) + \sum_2^{\infty} I_{ch} \sin(h\theta_s - \phi_h) \tag{II-20}$$

En multipliant L'équation II-20 respectivement par  $\sin(\theta_s)$  et  $\cos(\theta_s)$  nous obtiendrons les équations II-21 et II-22 :

$$I_{c1}(\theta_s) \cdot \sin(\theta_s) = \frac{I_{c1}}{2} \cos(\phi_1) - \frac{I_{c1}}{2} \cos(2\theta_s - \phi_1) + \sin(\theta_s) \cdot \sum_2^{\infty} I_{ch} \sin(h\theta_s - \phi_h) \tag{II-21}$$

$$I_{c1}(\theta_s).\cos(\theta_s) = -\frac{I_{c1}}{2}\sin(\phi_1) + \frac{I_{c1}}{2}\sin(2\theta_s - \phi_1) + \cos(\theta_s) \cdot \sum_2^{\infty} I_{ch}.\sin(h.\theta_s - \phi_h) \quad (\text{II-22})$$

Des équations II-20 et II-21, il apparaît que les composantes continues des produits sont proportionnels au courant fondamental actif et réactif. Le premier harmonique a une pulsation  $2\omega_s$ , aussi pour extraire les composantes continues nous utiliserons un filtre passe bas ayant une assez basse fréquence de coupure qui permettra de négliger les ondulations de la sortie.

Dans le cas idéal, après le filtrage on aura

$$[I_{c1}(\theta_s).\sin(\theta_s)]_{\text{filtré}} = \frac{I_{c1}}{2}\cos(\phi_1) \quad (\text{II-23})$$

$$[I_{c1}(\theta_s).\cos(\theta_s)]_{\text{filtré}} = \frac{I_{c1}}{2}\sin(\phi_1) \quad (\text{II-24})$$

Ce sont les composantes active et réactive du fondamental du courant, ce dernier est reconstituer en multipliant respectivement les équations II-23 et II-24 par  $2.\sin(\theta_s)$  et  $2.\cos(\theta_s)$  :

$$I_{cf} = I_{c1}\cos(\phi_1).\sin(\theta_s) + I_{c1}\sin(\phi_1).\cos(\theta_s) \Rightarrow I_{cf} = I_{c1}.\sin(\theta_s - \phi_1) \quad (\text{II-25})$$

**Remarque :**

Cette méthode peut générer les fondamentaux des courants où leurs contenues harmoniques et elle permet de compenser les courant harmoniques et les courant réactif indépendamment les uns des autres

## II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présentés théoriquement quatre méthodes d'identification des courants perturbateurs comme le courant harmonique, déséquilibré et réactif. Ces méthodes sont :

- Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées,
- Méthode de référentiel synchrone,
- Méthode de la moyenne des puissances monophasées,
- Méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée).

Le chapitre suivant sera dédié à l'application, par simulation, de ces méthodes pour l'identification des courants harmoniques triphasés équilibrés et déséquilibrés.

# **Chapitre III**

## **Résultats de simulation**

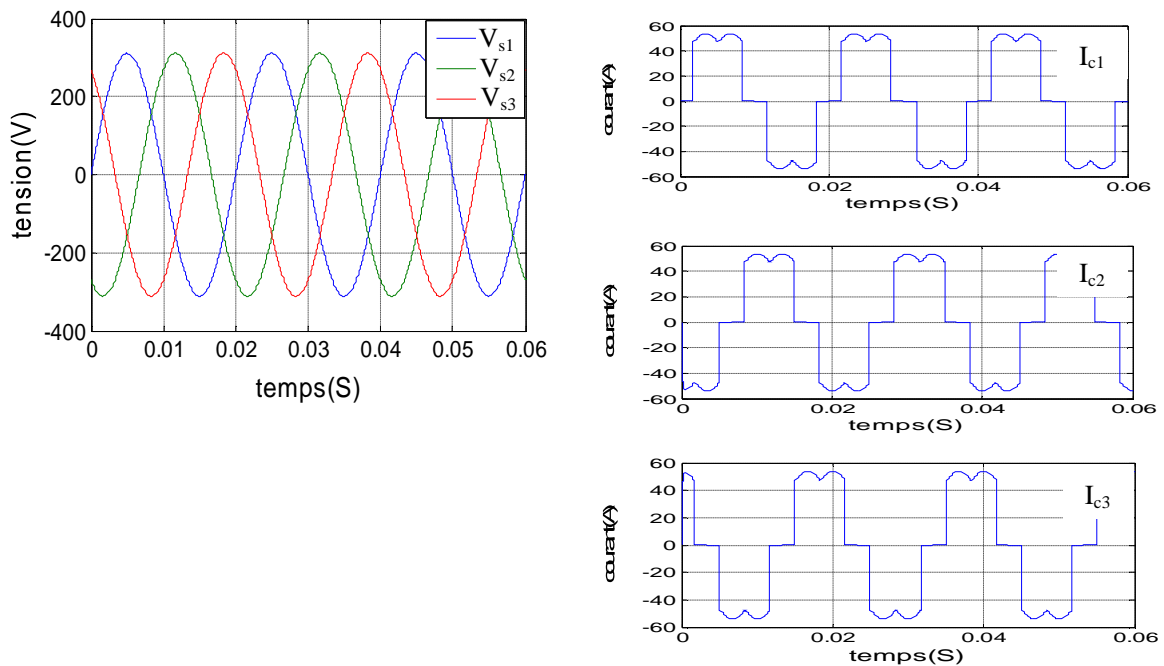
### III.1 Introduction

Dans cette partie, les méthodes d'identification considérées sont appliquées dans les cas des charges non-linéaires équilibrées et déséquilibrées. Les résultats de simulation sur le logiciel MATLAB sont présentés et discutés.

### III.2 Application des différentes méthodes d'identification

#### III.2.1 Charge triphasée non-linéaire équilibrée

Les tensions de phases du réseau électrique ainsi que les courants de phases de la charge triphasée non-linéaire équilibrée sont présentés dans la figure III.1.



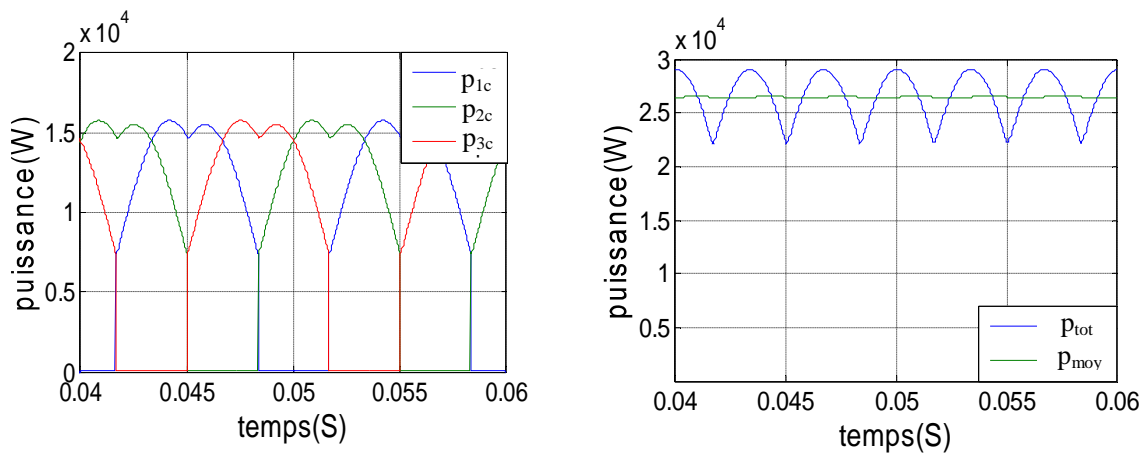
**Fig. III.1 Tension triphasée du réseau électrique et courant triphasé de la charge non-linéaire équilibrée**

### III.2.1.1 Méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées

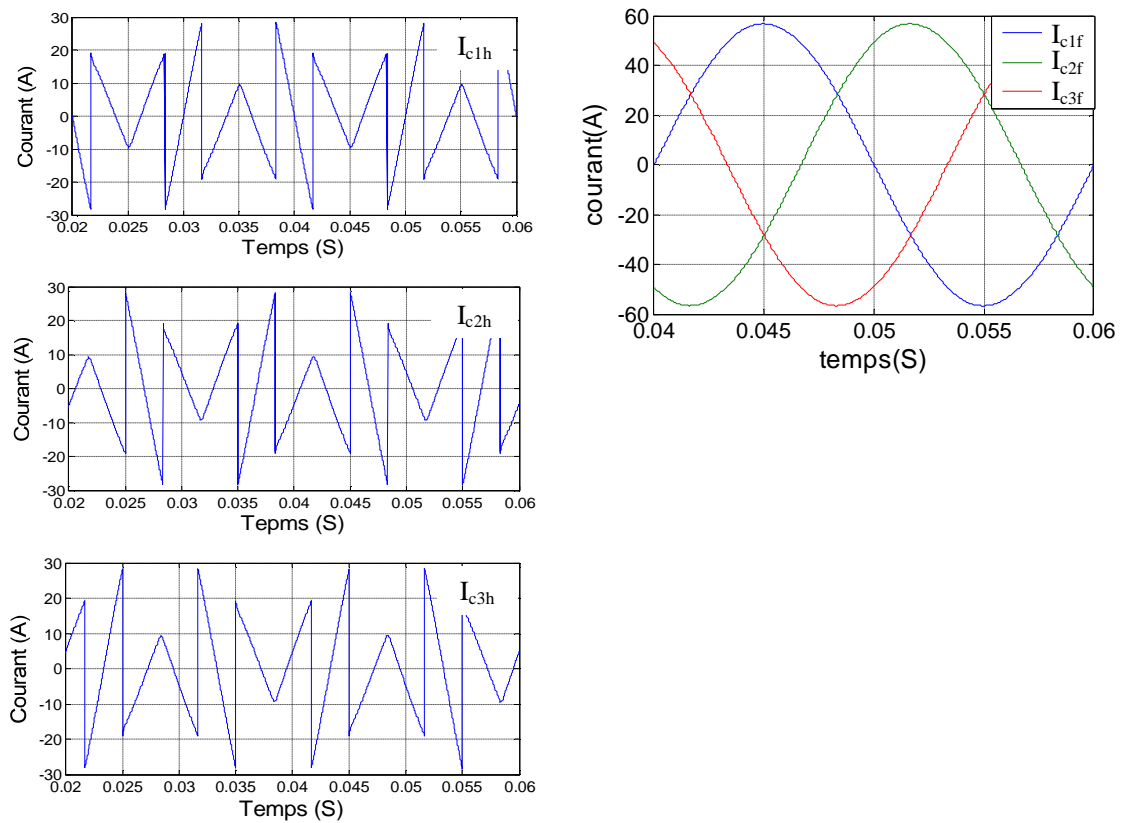
Il est remarquable la similitude des formes d'onde des puissances instantanées monophasées du fait que la charge triphasée (courants de la charge) et les tension du réseau sont équilibrées. La somme des puissances instantanées monophasées oscille autour de sa valeur moyenne (figure III.2).

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent la même forme d'onde avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.3).

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoïdaux de même amplitude avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.3).



**Fig. III.2 Puissances instantanées monophasées, leur somme et la valeur moyenne de leur somme**

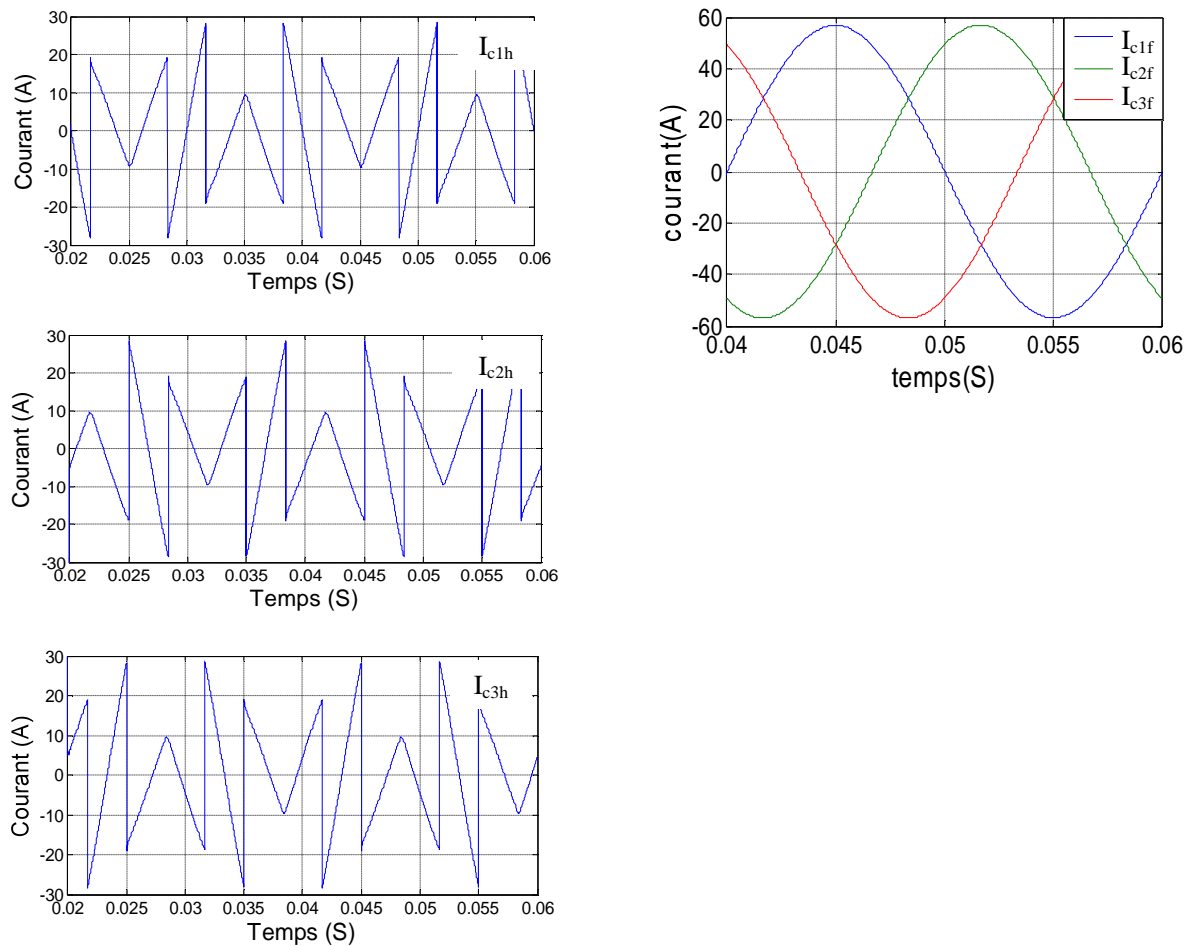


**Fig III.3 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés par la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées**

### III.2.1.2 Méthode trigonométrique (tri-monophasée)

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent la même forme d'onde avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.4). Ils sont similaires aux courants identifiés par la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées.

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoidaux de même amplitude avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.4).



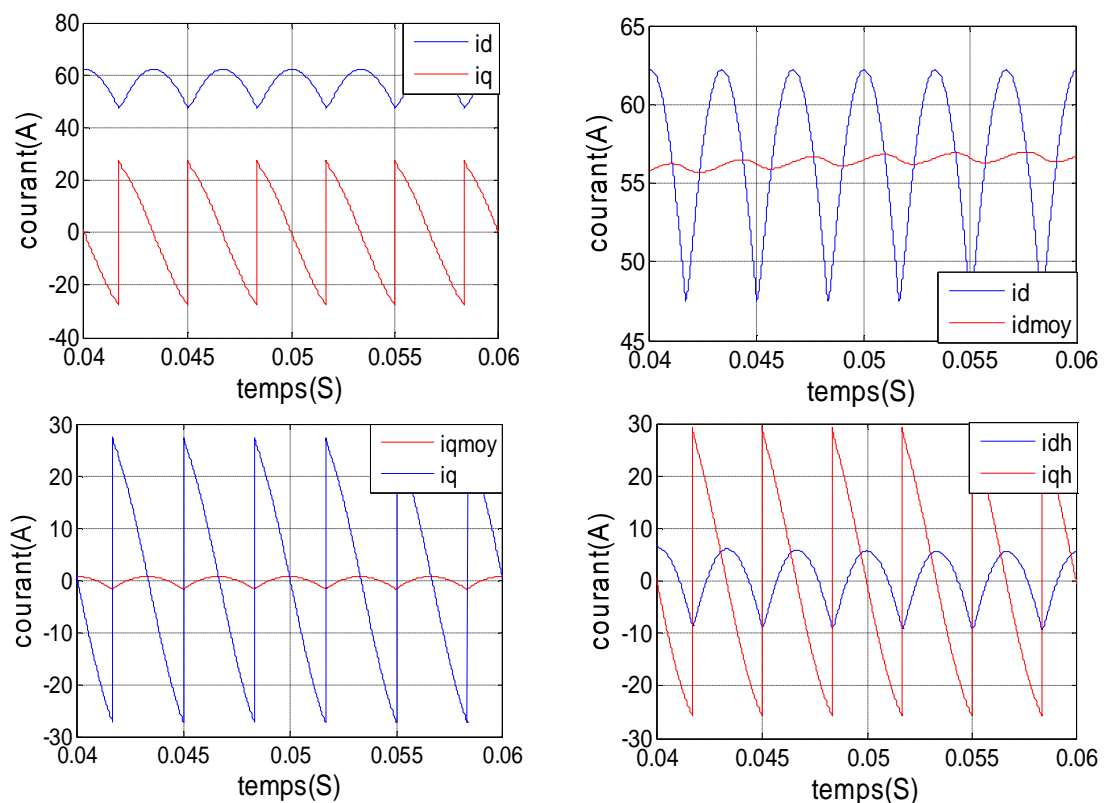
**Fig III.4 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés par la méthode trigonométrique**

### III.2.1.3 Méthode de référentiel synchrone

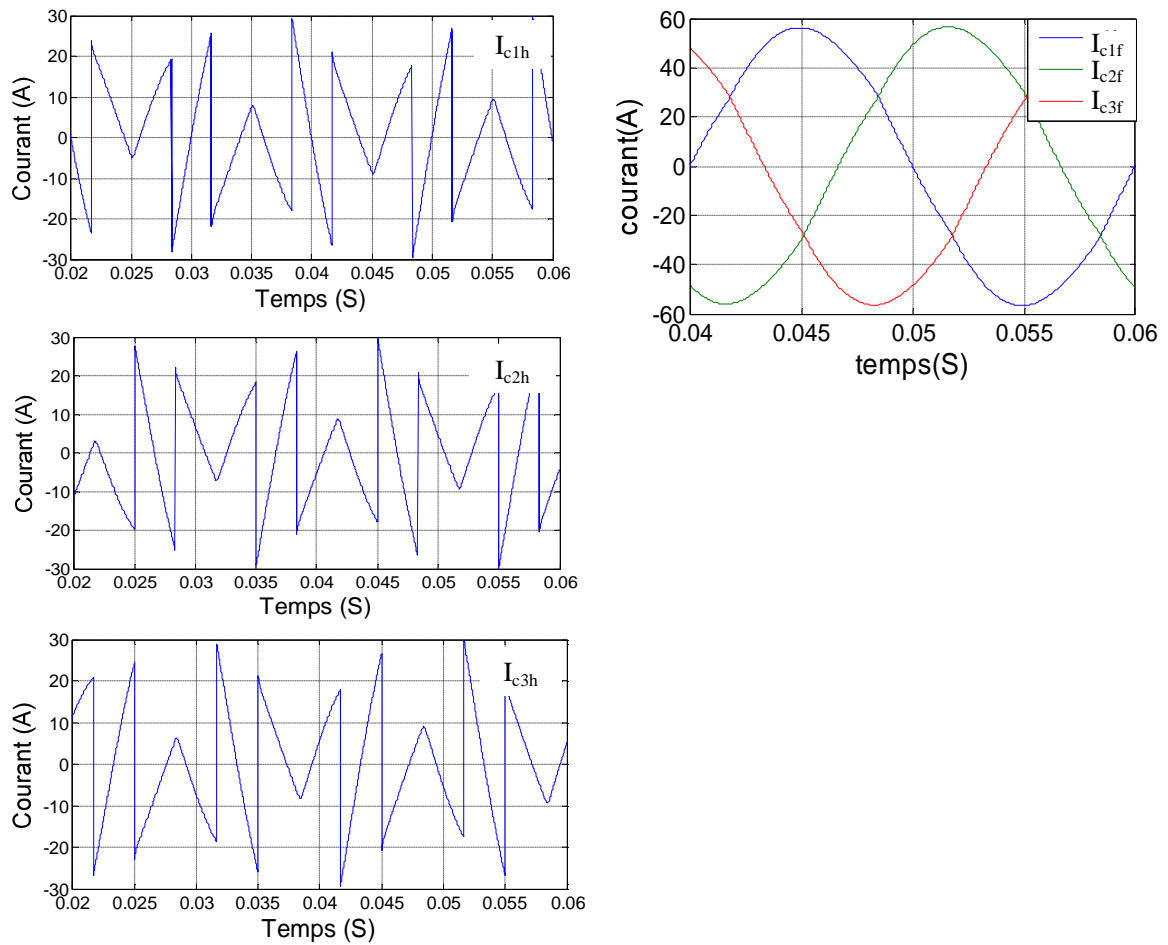
Dans la figure III.5 sont présentés les courants de charge dans le repère (d – q), leurs valeurs moyennes et composantes harmoniques dans le repère (d – q). Le courant  $I_d$  est un courant pulsatoire oscillant autour de sa valeur moyenne  $I_{dmoy}$ . De même, le courant  $I_q$  est un courant pulsatoire oscillant autour de sa valeur moyenne  $I_{qmoy}$ .

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent la même forme d'onde avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.6). Ils sont similaires aux courants identifiés par les deux méthodes précédentes.

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoidaux de même amplitude avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.6).



**Fig III.5 Courants de charge dans le repère (d – q), leurs valeurs moyennes et composantes harmoniques dans le repère (d – q)**



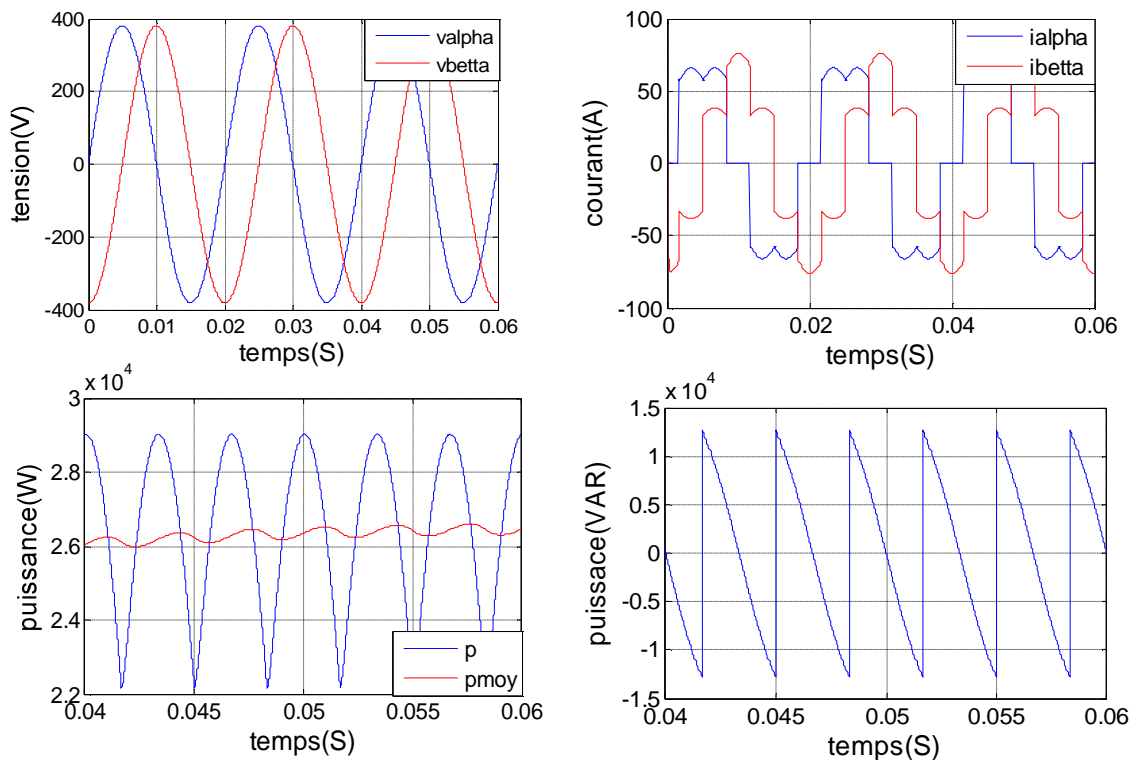
**Fig III.6 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode de référentiel synchrone**

### III.2.1.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

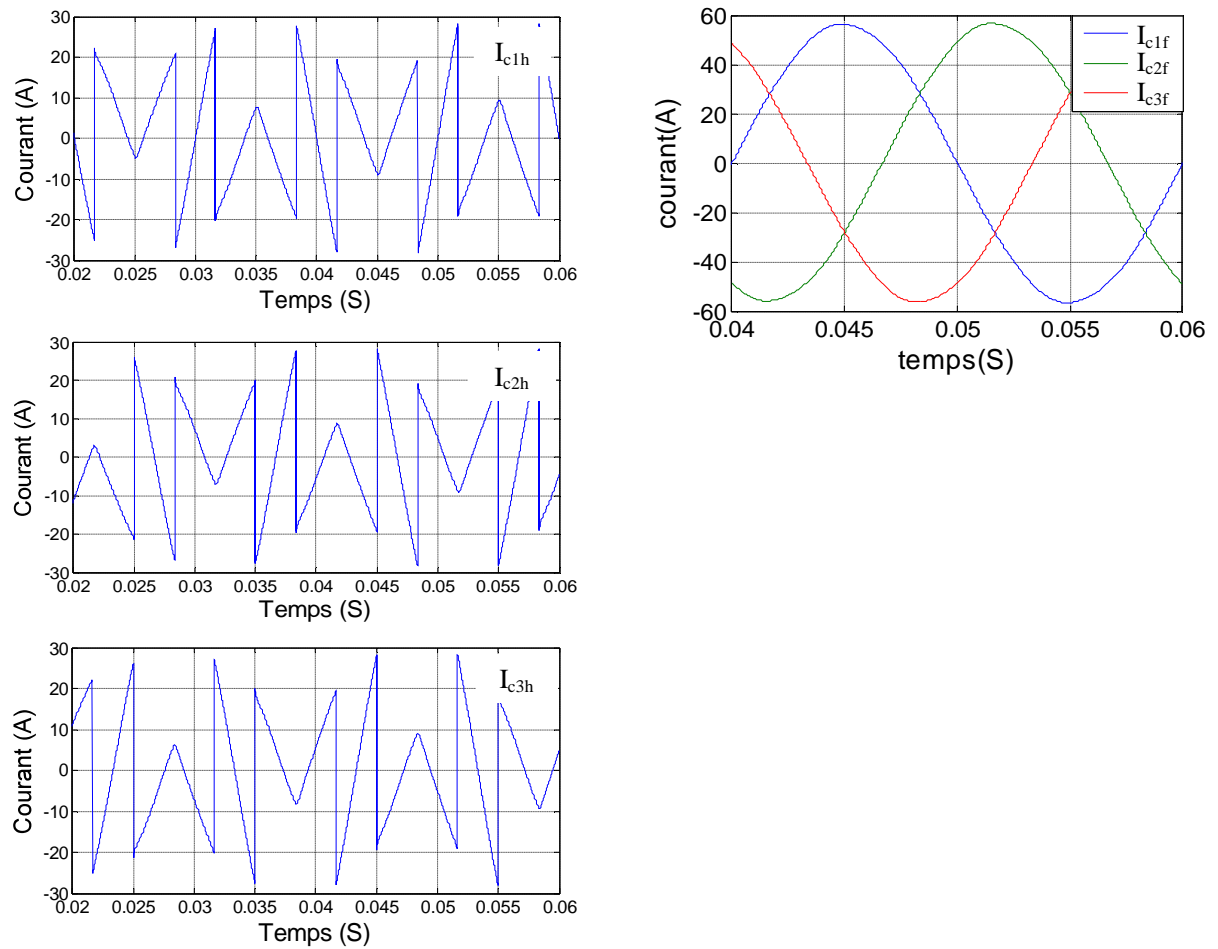
Dans la figure III.7 sont présentés les tensions de phase du réseau électrique ainsi que les courants de la charge non-linéaire triphasée équilibrée dans le repère  $(\alpha - \beta)$  et la puissance active avec sa valeur moyenne et la puissance imaginaire. Les tensions  $V_\alpha$  et  $V_\beta$  sont sinusoidales et déphasées (elles sont déphasées de  $90^\circ$ ). Les courants  $I_\alpha$  et  $I_\beta$  sont pollués et déphasés. La puissance active  $p$  est pulsatoire autour de sa valeur moyenne  $p_{moy}$ . La puissance imaginaire est pulsatoire autour de zéro (sa valeur moyenne est nulle) car le redresseur triphasé PD3 à diodes ne consomme pas de l'énergie réactive (pour chaque phase, la tension du réseau et le courant pollué de charge sont en phase).

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent la même forme d'onde avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.8). Ils sont similaires aux courants identifiés par les trois méthodes précédentes.

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoidaux de même amplitude avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.8).



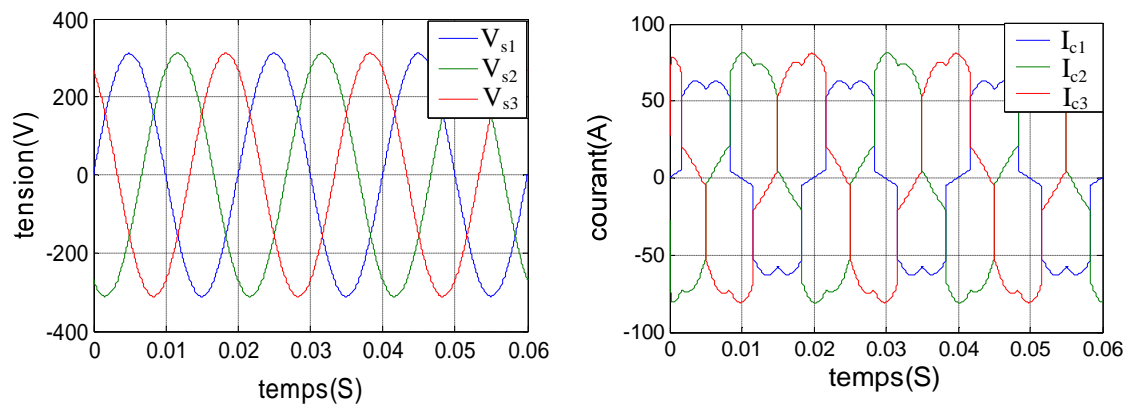
**Fig III.7 Tensions de phase du réseau électrique et courant de charge triphasée dans le repère de Concordia, puissance active et sa valeur moyenne et puissance imaginaire**



**Fig III.8 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées**

### III.2.2 Charge triphasée non-linéaire déséquilibrée

Les tensions simples du réseau électrique ainsi que les courants de phases de la charge triphasée non-linéaire déséquilibrée sont présentés dans la figure III.9.



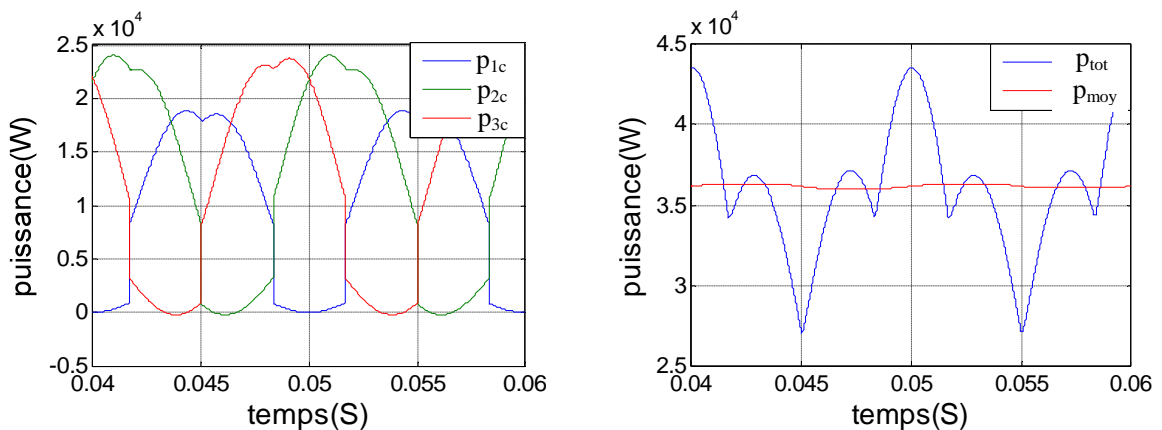
**Fig. III.9 Tension triphasée du réseau électrique et courant triphasé de la charge non-linéaire déséquilibrée**

### III.2.2.1 Méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées

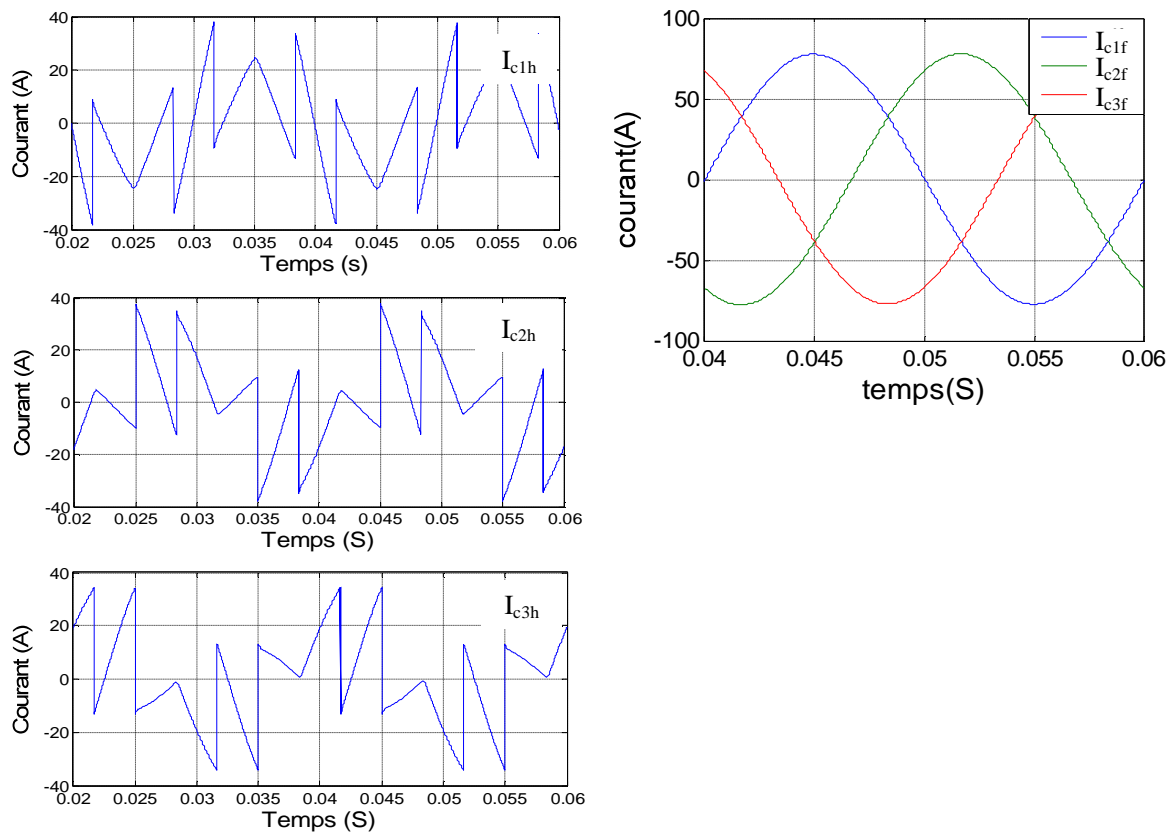
Il est remarquable la non-similitude des formes d'onde des puissances instantanées monophasées du fait que la charge triphasée (courants de la charge) est déséquilibrée. Par conséquence, la somme des puissances instantanées monophasées présente une ondulation plus grande que celle où le charge triphasée non-linéaire est équilibrée. Cette puissance oscille autour de sa valeur moyenne (figure III.10).

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent des formes d'onde différentes (figure III.11).

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoidaux de même amplitude avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.11).



**Fig. III.10 Puissances instantanées monophasées, leur somme et la valeur moyenne de leur somme pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée**

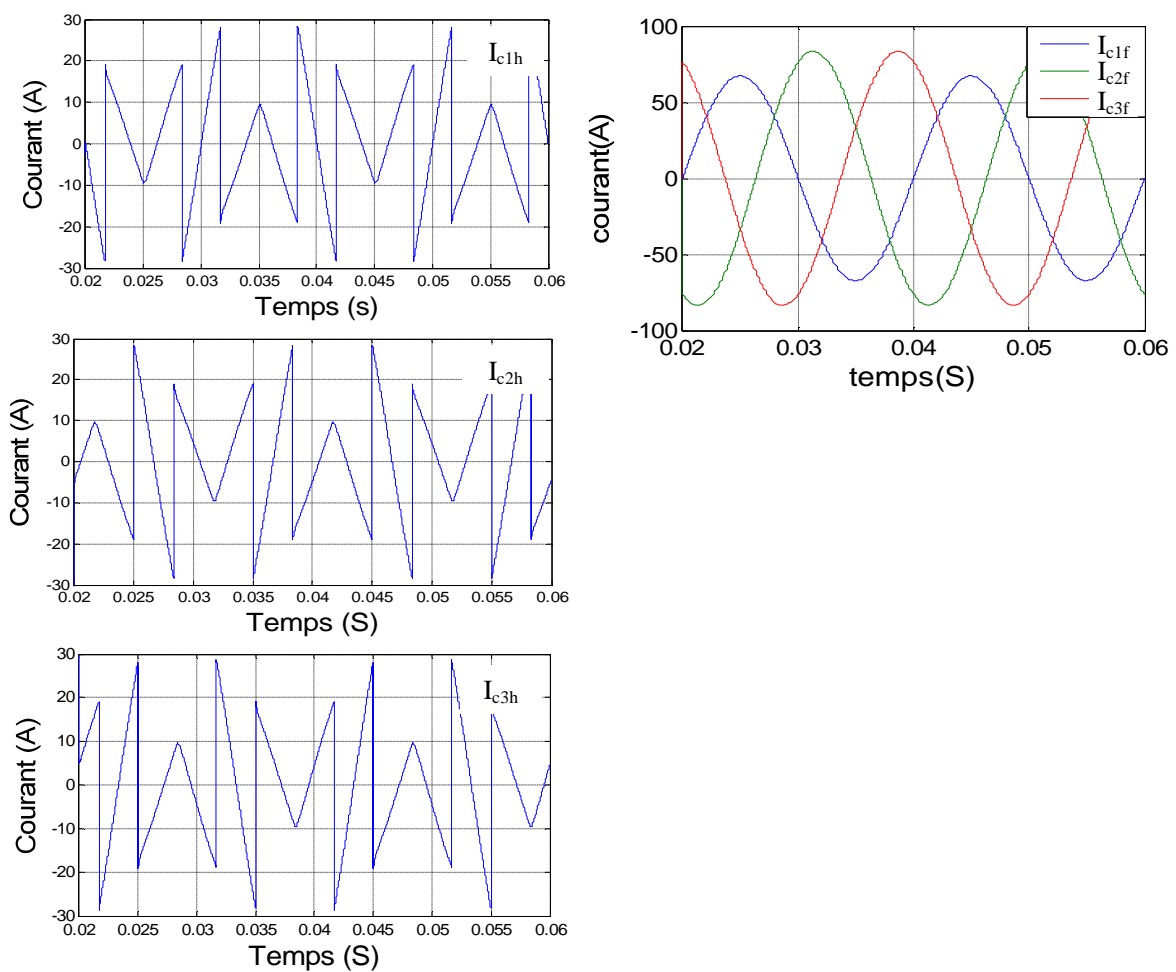


**Fig III.11 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés par la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée**

### III.2.2.2 Méthode trigonométrique (tri-monophasée)

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent la même forme d'onde avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.12).

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoidaux d'amplitudes différentes avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.12).



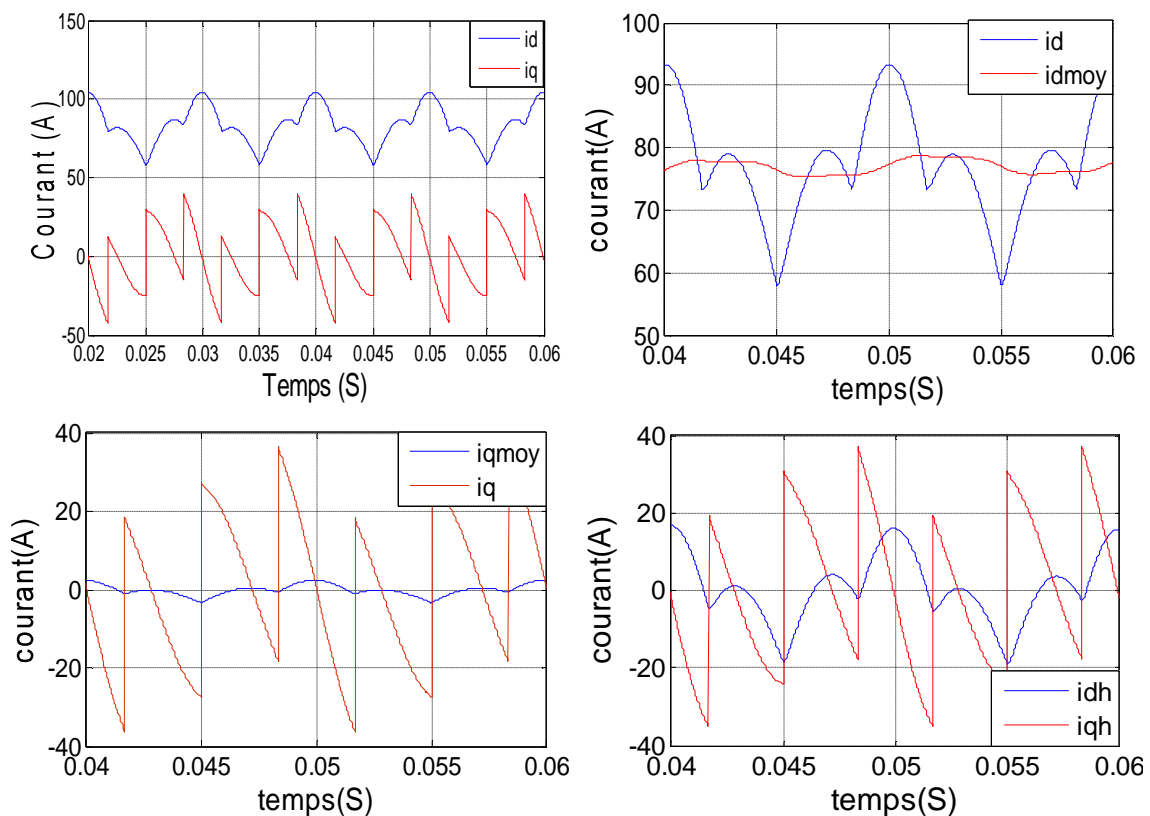
**Fig III.12 Courants harmoniques et composantes fondamentales identifiés par la méthode trigonométrique pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée**

### III.2.2.3 Méthode de référentiel synchrone

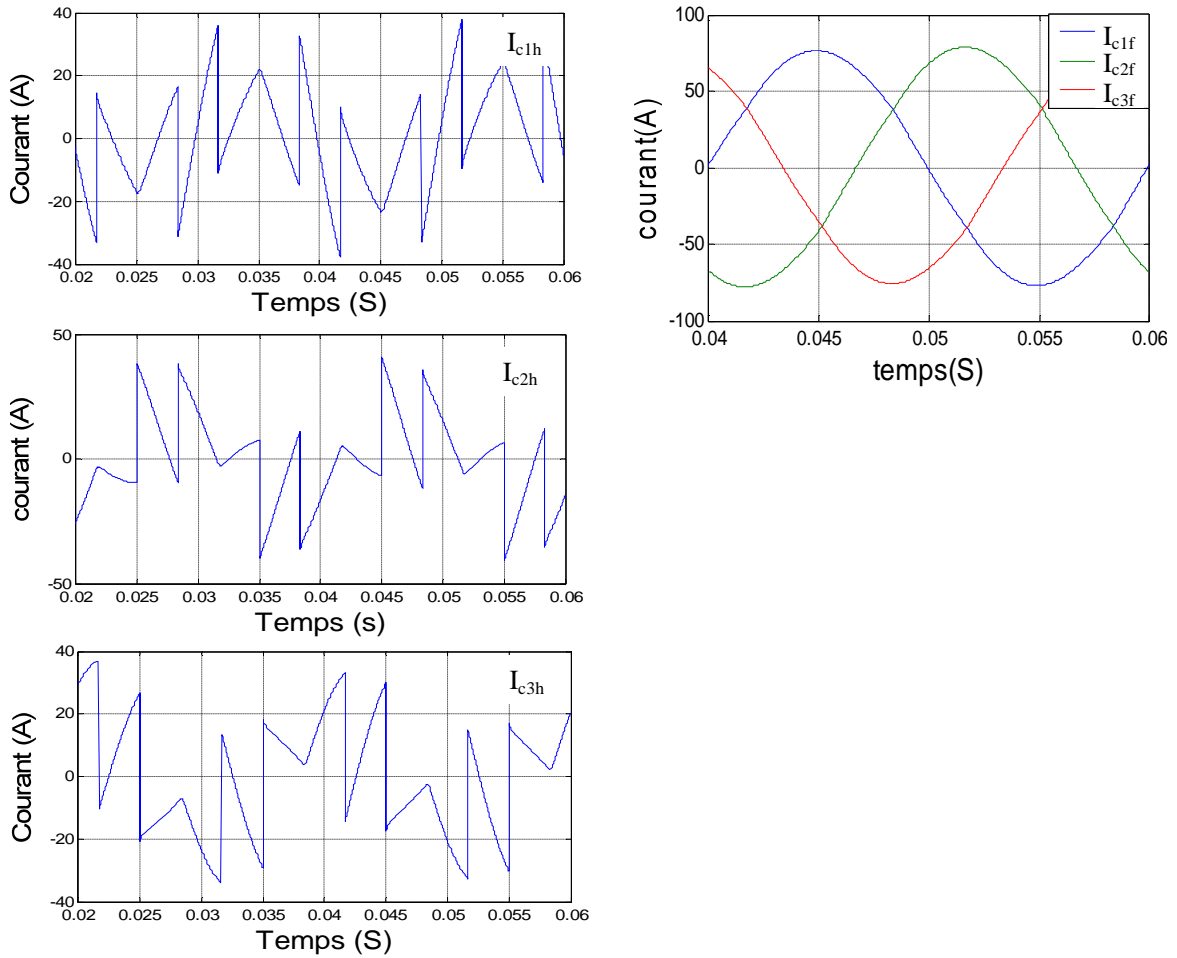
Dans la figure III.13 sont présentés les courants de charge dans le repère (d – q), leurs valeurs moyennes et composantes harmoniques dans le repère (d – q). Le courant  $I_d$ , plus ondulé que  $I_d$  pour une charge équilibrée, est un courant pulsatoire oscillant autour de sa valeur moyenne  $I_{dmoy}$ . Même remarque est constatée concernant le courant  $I_q$ .

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent des formes d'onde différentes (figure III.14) et similaires à celles des courants harmoniques identifiés par la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées.

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoidaux de même amplitude avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.14).



**Fig III.13 Courants de charge dans le repère (d – q), leurs valeurs moyennes et composantes harmoniques dans le repère (d – q) pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée**



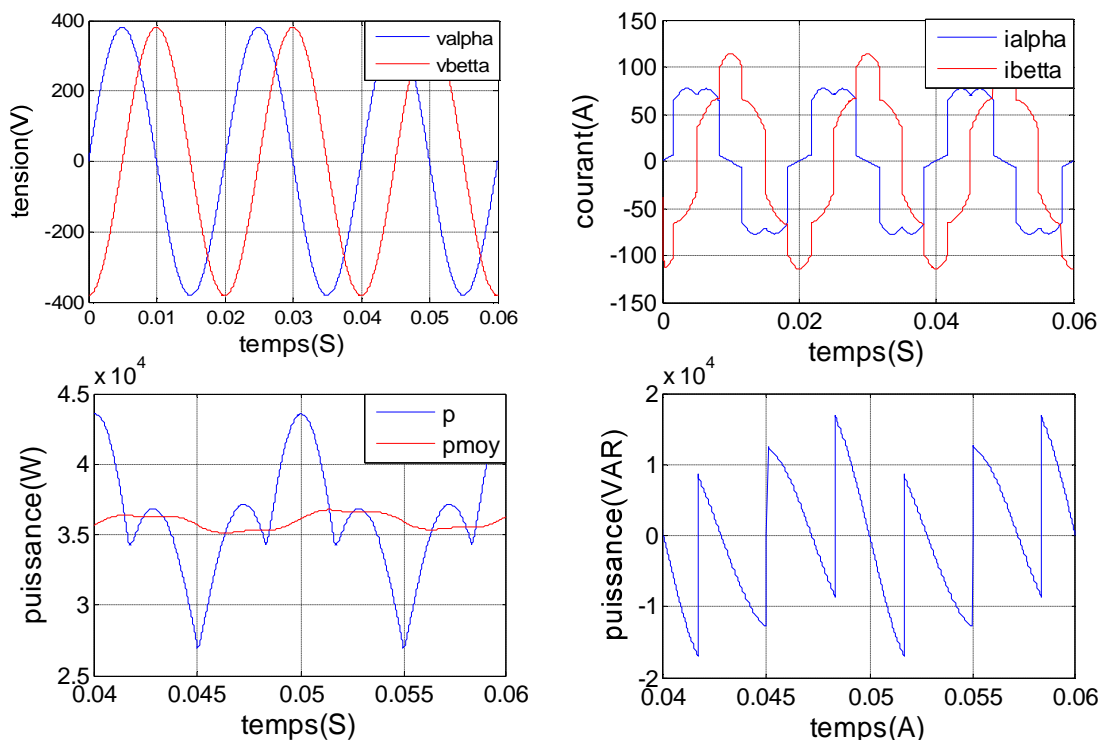
**Fig III.14 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode de référentiel synchrone pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée**

### III.2.2.4 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

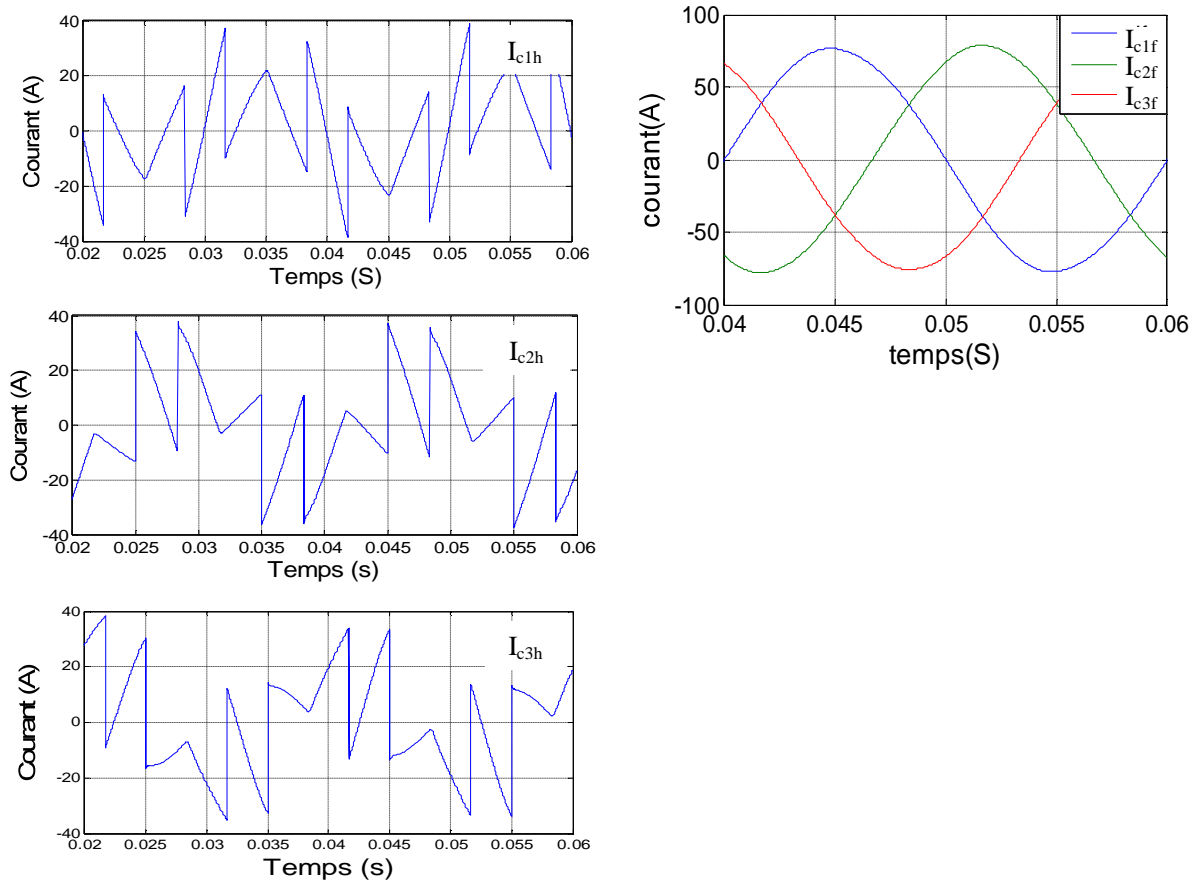
Dans la figure III.15 sont présentés les tensions de phase du réseau électrique ainsi que les courants de la charge non-linéaire triphasée déséquilibrée dans le repère  $(\alpha - \beta)$  et la puissance active avec sa valeur moyenne et la puissance imaginaire. Les tensions  $V_\alpha$  et  $V_\beta$  sont sinusoidales et diphasées (elles sont déphasées de  $90^\circ$ ). Les courants  $I_\alpha$  et  $I_\beta$  sont pollués et diphasés avec des formes d'ondes différentes par rapport à ceux correspondant à la charge non-linéaire triphasée équilibrée. La puissance active  $p$  est pulsatoire autour de sa valeur moyenne  $p_{moy}$ . La puissance imaginaire est pulsatoire autour de zéro.

Les courants harmoniques triphasés identifiés présentent des formes d'onde différentes (figure III.16) et similaires à celles des courants harmoniques identifiés par la méthode de référentiel synchrone et la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées.

Les courants fondamentaux triphasés identifiés sont quasiment sinusoidaux de même amplitude avec un déphasage de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre (figure III.16).



**Fig III.15 Tensions de phases du réseau électrique et courant de charge triphasée dans le repère de Concordia, puissance active et sa valeur moyenne et puissance imaginaire pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée**



**Fig III.16 Courants harmoniques triphasés et composantes fondamentales triphasées identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour une charge triphasée non-linéaire déséquilibrée**

Dans le tableau III.1 sont récapitulées les caractéristiques des quatre méthodes d'identification des courants harmoniques triphasés équilibrés et déséquilibrés.

	Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées	Méthode de référentiel synchrone	Méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées	Méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée)
Identification du courant harmonique	Oui	Oui	Oui	Oui
Identification du déséquilibre du courant triphasé	Oui	Oui	Oui	Non

**Tab. III.1** Caractéristiques des méthodes d'identification des courants harmoniques triphasés

### **III.3 Conclusion**

La simulation des méthodes considérées d'identification des courants harmoniques triphasés équilibrés et déséquilibrés a permis de définir l'aptitude de chaque méthode à identifier le courant harmonique et le courant de déséquilibre.

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, la méthode de référentiel synchrone et la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées, sont capables d'identifier le courant harmonique et le courant de déséquilibre. Par contre, la méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée) est capable d'identifier le courant harmonique mais pas le courant de déséquilibre.

# CONCLUSION GENERALE

## Conclusion générale

Ce travail présent l'étude de différentes méthodes d'identification des perturbations générées par les charges dites non-linéaires telles que les courants harmoniques et le déséquilibre du courant. Ces méthodes sont :

- Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées,
- Méthode de référentiel synchrone,
- Méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées,
- Méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée).

La simulation des méthodes considérées d'identification des courants harmoniques triphasés équilibrés et déséquilibrés a permis de définir l'aptitude de chaque méthode à identifier le courant harmonique et le courant de déséquilibre.

La méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, la méthode de référentiel synchrone qu'elle est la meilleure (on utilise les courants des charges) et la méthode de la moyenne de la somme des puissances monophasées, sont capables d'identifier le courant harmonique et le courant de déséquilibre. Par contre, la méthode trigonométrique (méthode tri-monophasée) est capable d'identifier le courant harmonique mais pas le courant de déséquilibré.

On espère que les résultats obtenus dans ce mémoire peuvent construire une base pour des prochains travaux de recherche sur la qualité d'énergie électrique. On propose comme perspective :

- L'étude de l'aptitude d'identification du courant réactif pour les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques.
- L'application des ces méthodes d'identification dans les compensateurs actifs (filtre actif parallèle).
- L'adaptation de ces méthodes d'identification afin de permettre le diagnostic des défauts des charges non-linéaires ou des compensateurs actifs.

ANNEXE

# Annexe

## **Paramètres de simulation :**

### **Réseau électrique :**

Tension efficace :  $V_{s1\text{eff}} = V_{s2\text{eff}} = V_{s3\text{eff}} = 220 \text{ V}$ .

Fréquence : 50 Hz

### **Charge non-linaire (redresseur PD3 à diodes) :**

$R = 10 \Omega$

$L = 0.001 \text{ H}$

### **Charge déséquilibrée (charge résistive triphasée en étoile) :**

$R1 = 40 \Omega$ ,

$R2 = 10 \Omega$ ,

$R3 = 5 \Omega$ .

### **Filtre passe-bas :**

Constante de temps  $\tau = 0,01$ ,  $f_c = 15 \text{ Hz}$ .

# BIBLIOGRAPHIE

## Références bibliographiques

- [1] **T. BENSLIMANE**, « Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome », Mémoire de Magister, Ecole militaire polytechnique, Alger, 2004.
- [2] **ALIREZA JAVADI**, « Modeling, simulation and real-time control of active filters », Doctoral thesis, Université de MONTRÉAL, CANADA, 2009.
- [3] **MOHAMED MAGRAOUI**, « Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle », Mémoire d'ingénieur, Ecole de technologie supérieure, QUÉBEC, CANADA, 2007.
- [4] **C.FETHA**, « Analyse et amélioration de l'indice de la non symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique », Thèse de Doctorat, Université de BATNA, 2006.
- [5] **DJ. OULD ABDESLAM**, «Techniques neuromimetiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électrique basse tension», Thèse de Doctorat, Ecole Doctorat Pluridisciplinaire JEAN-HENRI LAMBERT, 2005.
- [6] **MOHAMED ALAA EDDIN ALALI**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électrique basse tension», Thèse de Doctorat, Université LOUIS PASTEUR-STRASBOURG, 2002.
- [7] **R.S HERRERA, P.SALMERON**, « Instantaneous reactive power theory : a comparative evaluation of different formulations », IEEE Transactions on power delivery, Vol. 22, N°01, PP 595-604, JANUARY 2007.
- [8] **DZOWDE NAOUSSI**, « Implantation de réseaux neuromimetiques sur cible FPGA-application à l'intégration d'un système de filtrage actif », Thèse de Doctorat en cotutelle, Université de STRASBOURG et Université de DOUALA, 2011.
- [9] **N.K. NGUYEN, P.WIRA, D.FLIELLER, D.OULD ABDESLAM, AND J.MERCKLE**, « Adaptive on-line learning and identification of harmonic currents with adaline networks », National conference on electrical networks (NCEN 10), Sidi BEL ABBES, ALGERIA, 2010.

- [10] **R.S. HERRERA, P.SALMERON**, « Instantaneous reactive power theory: a reference in the nonlinear loads compensation », IEEE Transactions on industrial electronic, Vol. 56, N°06, PP 2015-2022, JUNE 2009.
- [11] **M. AISSANI**, « Commande numérique d'un convertisseur triphasé à quatre bras par MLI vectorielle à trois dimensions (application au filtrage actif) », Mémoire de Magister, EMP, Alger, 2009.
- [12] **S.A. TADJER**, « Etude d'un système de compensation des harmoniques en utilisant un générateur photovoltaïque «GPV» », Mémoire de Magister, Université de Boumerdes, 2008.
- [13] **HYDRO-QUEBEC–TRANSÉNERGIE**, « Études de réseau et Critères de Performance Direction Planification des actifs et affaires réglementaires » Hydro-Québec–TransÉnergie, édition en vigueur Le10juillet 2002.
- [14] **M.Y.HAMMOUDI**, « Commande Non Linéaire d'un Filtre Actif de Compensation Appliqué à un Convertisseur AC /DC Triphasé », Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2006
- [15] **[HTTP://EN.WIKIPEDIA.ORG/WIKI/THREE-PHASE](http://en.wikipedia.org/wiki/Three-phase)**, « Unbalanced Three-phase Current Calculation » Brick, NJ (USA) Mar 2007.
- [16] **R. ZHANG**, « High performance power converter systems for nonlinear and unbalanced load/source » Thèse de Doctorat, Université de Blacksburg, Virginia November 17, 1998
- [17] **PH.FERRACCI**, « La qualité de l'énergie électrique » Cahier Technique Schneider Electric n° 199 / p.32, édition octobre 2001
- [18] **HIPULSE 80-4800 KVA** « Alimentation statique sans interruption » Liebert Corporation,2002
- [19] **R.ZAITER et C.ZANBOUA**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Mémoire d'ingénieur, Université de M'sila, 2009.
- [20] **H.AKAGUI, Y. KANAWAZA**, "Instantaneous reactive power compensators compressing switthcing devices without energy storage components" IEEE Trans on ind, vol IA-20,1984 , pp 625,630.

- [21] **H.AKAGUI, A.NABAE**, «The p-q theory in three phase systems under non-sinusoidal conditions», ETEP, vol 3, N°1, January/february 1993, pp27-30.
- [22] **M.BENHABIB**, « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande », Thèse de Doctorat, Université Henrie Poincaré, France, 2004.
- [23] **J.W.Dixon, J.J.Gaarcia, L.Moran**, «Control system for three-phase active power filter wich simultaneously compensates power factiors and unbalanced loads» IEEE Trans. On industry, Electronics, Vol 42, N° 6, December 1995, pp 636-641.
- [24] **C.Y.Hsu, H.Y.Wu**, «A new single-phase active power filter wich reduced energy storage capacitor», PESC'95, Atlanta, Vol 1, pp 202-208.
- [25] **H.L.Jou, J.C.Wu and H.Y. Chu**, «A new single-phase active power filter», IEEE Trans. On industry, Electronics, Vol 141, N° 3, May 1994, pp 129-134

**MEMOMIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME  
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE**

**SPECIALITE: AUTOMATIQUE**

**Proposé et dirigé par : Dr. Tarak BENSLIMANE**

**Présenté par: Ahlam GUERBAS**

**Thème :**

**IDENTIFICATION DES COURANTS HARMONIQUES POUR LES CHARGES  
NON-LINEAIRES EQUILIBREES ET DESEQUILIBREES**

**Résumé :**

**Dans un réseau électrique les harmoniques, la puissance réactive et les déséquilibres de courant ont des effets néfastes sur les équipements électriques. L'identification de ces courants, en temps réel et avec précision, est une étape indispensable dans les systèmes de filtrage. Dans ce mémoire, on applique différentes méthodes d'identification afin de définir leur performances vis-à-vis l'identification des courants harmoniques et le déséquilibre des courants triphasés.**

**Mots clés :**

**Charge non-linéaire, Harmonique de courant, Déséquilibre des courants triphasés, Identification.**

**N° d'ordre:10**