

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



**Université Echahid Hamma Lakhdar-
El-Oued**
Faculté des Sciences et de Technologies



Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de
LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Réseaux Électriques

Thème

**Performances des Méthodes p-q et p-q Modifiée
pour l'Identification des Courants Harmoniques en
Conditions non Idéales**

Réalisé par :

BOUHENNI Brahim
SAIED Elabbes
CHERIFI Noureddine
NECIBI Sadok

Dirigé par :

Dr. MESBAHI Nadhir

Année universitaire : 2014/2015

Remerciements

Nous rendons nos profondes gratitude à dieu qui nous a aidé réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons nos profondes gratitude à nos parents pour leur encouragements, leur soutiens et pour sacrifices qu'ils ont enduré.

Nous remercions nos encadreur "Dr Nadhir MESBAHI" pour les efforts qu'ils ont déployés, pour nous aider conseiller, encourager et corriger.

Nous remercions aussi tous le corps enseignants et administratifs qui ont contribué à notre formation universitaire.

Liste des Tableaux

Chapitre III

Tableau III.2. THDs des courants i_c et ($i_c - i_{ref}$) lorsque les tensions de source sont déséquilibrées	24
--	----

Liste des figures

Chapitre I

Figure .I.1.	harmoniques.	5
Figure .I.2.	Filtre actif série.	9
Figure .I.3.	Filtre actif parallèle.	9

Chapitre II

Figure .II.1.	Schéma représentant le principe de séparation des puissances.	15
Figure. II.2.	Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées	15
Figure. II.3.	Schéma bloc du <i>FMV</i> .	17
Figure. II.4.	Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées modifiée.	17

Chapitre III

Figure III.1.	Source triphasés et une charge non linéaire	21
Figure III.2.	Tensions de source et courant de charge (phase 1).	22
Figure III.3.	Résultats de simulations pour les deux méthodes (phase 1).	22
Figure III.4.	Résultats de simulations pour les deux méthodes (phase 1).	24

Liste des Symboles

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}	Tensions instantanées au point de couplage
i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}	Courants débités par le réseau
i_{ca}, i_{cb}, i_{cc}	Courant de charge
$i_{refa}, i_{refb}, i_{refc}$	Courants de référence
i_{α}, i_{β}	Courants de charge dans le plan (α, β)
$i_{h\alpha}, i_{h\beta}$	Courants de harmonique
P	Puissance active
q	Puissance reactive

Liste des Notations

FMV	Filtre Multi-Variable
FPB	Filtre Passe-Bas
THD	Total Harmonic Distortion

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre I : Notions sur la qualité de l'énergie électrique et les solutions de dépollution harmonique	3
I.1. Introduction	4
I.2. Qualité de la tension	4
I.3. Qualité du courant	4
I.4. Harmonique	4
I.4.1. Inters harmoniques	5
I.4.2. Infra-harmoniques	5
I.5. Effets de la pollution harmonique	5
I.5.1. Effets instantanés	6
I.5.2. Effets différés	6
I.6. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie	6
I.6.1. Creux de Tension	6
I.6.2. Dépollution des Harmoniques	6
I.6.3. Solutions traditionnelles	7
I.6.3.1. Statocompensateur	7
I.6.3.2. Rééquilibrage des courants du réseau électrique	7
I.6.3.3. Filtres passif	7
I.6.3.4. Filtre passif série	7
I.6.3.5. Filtre passif parallèle	7
I.6.4. Solutions modernes	8
I.6.4.1. Solutions modernes à base d'électronique de puissance	8
I.6.4.2. Filtres actifs	8
I.6.4.3. Filtre actif série (FAS)	8
I.6.4.4. Filtre actif parallèle	9
I.6.4.5. Filtre hybride	9
I.7. Conclusion	10
Chapitre II : Principes théorique de p-q et p-q modifiée d'identification des harmoniques	11
II.1. Introduction	12
II.2. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées	12
II.2. Méthode des puissance réelle et imaginaire instantanées modifiée	16
II.2.1. Principe du FMV	16
II.2.2. Extraction des courants harmoniques	17
II.3. Conclusion	19
Chapitre III : Simulation et interprétations des résultats	20
III.1. Introduction	21
III.2. Résultats de simulation	21
III.2.1. Cas d'une tension de source équilibrée	21
III.2.2. Cas d'une tension de source déséquilibrée	23
III.3. Conclusion	24
Conclusion Générale	25
Références Bibliographiques	27

Introduction Générale

La large utilisation des systèmes à base d'électronique de puissance, notamment les convertisseurs statiques, durant ces dernières décennies, a entraîné une dégradation significative de la qualité de l'énergie électrique. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges dites déformantes.

Ces charges non linéaires, telles que les redresseurs à diodes et à thyristors, les gradateurs, les ordinateurs et leurs périphériques et les appareils de climatisation et d'éclairages à base de tubes fluorescents, consomment un courant non sinusoïdal. Ces appareils absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale et de ce fait introduisent des pollutions harmoniques sur les courants et les tensions des réseaux de distribution électrique.

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à la comparaison de stratégies d'identification des courants harmoniques.

Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre du mémoire recense les perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau électrique basse tension et expose leurs causes et leurs conséquences. Les solutions de dépollution existantes, tant traditionnelles que modernes sont rappelées.

Le chapitre deux est consacré aux rappels des notions de base de méthodes d'identification des courants harmoniques, en particulier, de synthèses de méthode quand le problème déséquilibre des tensions de source est posé.

Le troisième chapitre est consacré à la comparaison des résultats de simulation de deux méthodes d'identification : méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et méthode des puissance réelle et imaginaire instantanées modifiée.

La comparaison a lieu en analysant les courant harmoniques, en régime équilibré et, dans certains cas, en cas de déséquilibre de la tension.

Nous terminons par une conclusion générale sur l'ensemble de cette étude.

Chapitre I

Notions sur la qualité de l'énergie électrique et les solutions de dépollution harmonique

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les caractéristiques des perturbations harmoniques, notamment leurs origines et conséquences. Ensuite, nous exposons les solutions classiquement mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques.

I.2. Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales :

- L'amplitude ;
- La fréquence ;
- La forme d'onde et symétrie ;
- Le déséquilibre [1].

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique. Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie, des normes ont déjà été établies.

I.3. Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constantes, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement lié à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension [2].

I.4. Harmonique

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale [3].

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire (fours à arc inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.)[4].

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau [5].

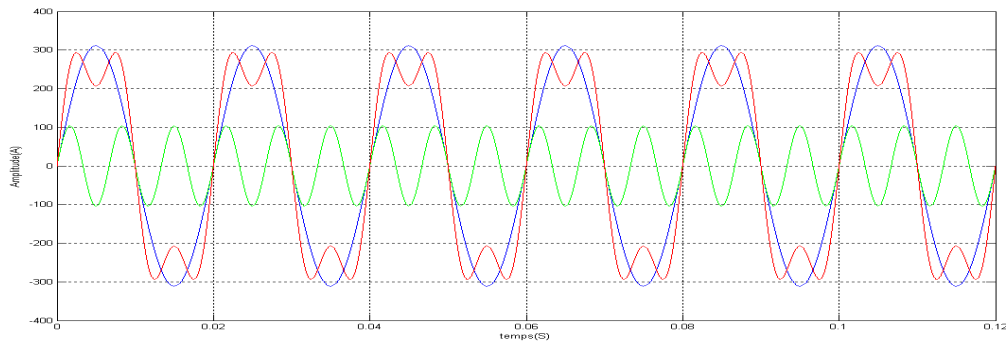


Fig. I.1: Harmoniques.

I.4.1. Inters harmoniques

Les inter-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale.

I.4.2. Infra-harmoniques

Les infra harmoniques sont des signaux de fréquence inférieure à celle du fondamentale [3].

I.5. Effets de la pollution harmonique

Les courants harmoniques associés aux différentes impédances du réseau vont donner naissance à des tensions harmoniques qui vont se superposer à la tension fondamentale du réseau. La tension qui en résulte n'est plus sinusoïdale. La pollution alors présente sur le réseau de distribution pourrait être préjudiciable au bon fonctionnement de tous les récepteurs (ou charge) raccordés sur ce même réseau. On distingue deux types d'effet des harmoniques sur les équipements électriques :

I.5.1. Effets instantanés

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement. Par exemple, dans le cas des appareils électroniques, il peut s'agir d'une altération de l'image pour les écrans de télévision ou une altération du son s'il s'agit d'une chaîne HI-FI ou d'un téléphone. La précision des appareils de mesure est également affectée par la présence d'harmoniques. [6]

I.5.2. Effets différés

Ils se manifestent après une exposition longue au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil [7].

I.6. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie. Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau [8].

I.6.1. Creux de Tension

Pour les creux de courte durée, peu profondes, ils peuvent être atténués par l'amélioration des caractéristiques de la tolérance d'équipements, pour les creux de longue durée, ils peuvent être évités par le changement et/ou le fonctionnement de la structure de système d'alimentation. Une autre solution consiste à étendre un convertisseur électronique de puissance, utilisé pour connecter un système de grille de production décentralisée, avec un compensateur série. Le compensateur série est capable de restaurer la tension au niveau du côté de la charge en cas de chute de tension [9].

I.6.2. Dépollution des harmoniques

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation. Ils travaillent en

combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier. Deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués: les solutions traditionnelles et les solutions modernes [10].

I.6.3. Solutions traditionnelles

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

I.6.3.1. Statocompensateur

Il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance [11].

I.6.3.2. Rééquilibrage des courants du réseau électrique

Répartition égale des charges sur les trois phases. Compensateur passif, par exemple montage de Steinmetz qui provoque un fort déséquilibre pour les fréquences différentes de 50Hz avec des résonances qu'il faut éviter d'exciter à proximité d'un générateur d'harmonique [12].

I.6.3.3. Filtres passifs

Le plus ancien pour le traitement des harmoniques de courant. Il consiste à piéger les courants harmoniques pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau [11].

I.6.3.4. Filtre passif série

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série, dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire [13].

I.6.3.5. Filtre passif parallèle

Le filtre passif parallèle est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment

importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau [14].

I.6.4. Solutions modernes

I.6.4.1. Solutions modernes à base d'électronique de puissance

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les *IGBT*, *IGCT*, *GTO* et *MOSFET*, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques.

Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer : les filtres actifs: parallèles, séries, hybrides et combinaisons des structures;

I.6.4.2. Filtres actifs

Les principes de base des filtres actifs (compensation active) pour les harmoniques perturbateurs ont été proposés autour de la décennie de 1970. Depuis, beaucoup de recherches ont été développées sur ces systèmes et leurs applications pratiques [15].

Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement de compensation comporte certains inconvénients, pour cela les filtres actifs ont été proposés pour bien améliorer la qualité de l'énergie électrique. Une des applications principales de filtres actifs est l'élimination ou la réduction des harmoniques de courant et de tension. Le principe du filtrage actif est de compenser les harmoniques présents sur les réseaux électriques en injectant des harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase. Le circuit d'alimentation dans le diagramme généralisé peut être connecté en configuration parallèle, série ou hybride [10].

I.6.4.3. Filtre actif série (FAS)

Le rôle d'un FAS est de modifier localement l'impédance du réseau. Il se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation de courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la

charge peut être rendue sinusoïdale . Cependant, le FAS ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

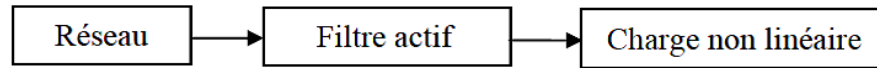


Fig. I.2: Filtre actif série.

I.6.4.4. Filtre actif parallèle

Le FAP, permet, avec une commande appropriée, de neutraliser les courants harmoniques des charges polluantes et de compenser les déséquilibres et les courants réactifs [16].

Le FAP se connecte en parallèle avec le réseau et injecte en temps réel les composantes harmoniques des courants absorbés par les charges non linéaires connectées au réseau. Ainsi, le courant fourni par la source d'énergie devient sinusoïdal [2].

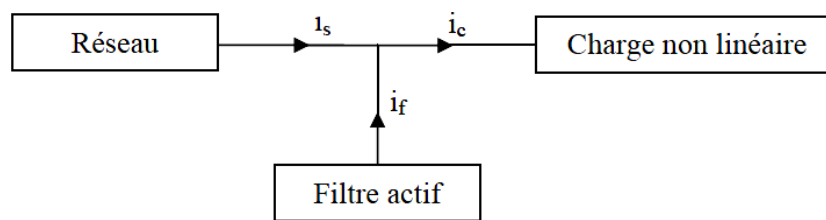


Fig.I.3: Filtre actif parallèle.

I.6.4.5. Filtre hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur : il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs [17].

I.7. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exposé une idée générale sur la notion d'harmoniques, et principalement sur leurs sources, leurs caractéristiques, leurs influences sur les réseaux de distribution d'énergie et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions existantes, notamment les techniques de filtrage.

Chapitre II

**Principes théorique de p-q et p-q
modifiée d'identification des
harmoniques**

II.1. Introduction

La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés.

Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être regroupées selon deux approches [18]:

- Identification dans le domaine fréquentiel :

Ce type d'approche utilise la transformée de Fourier rapide, pour extraire les harmoniques du courant de charge. Cette méthode est particulièrement adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle présente également l'avantage de sélectionner chaque harmonique individuellement et permet ainsi de ne compenser que les courants harmoniques prépondérants. Cependant, cette méthode nécessite des calculs lourds afin d'identifier ces courants harmoniques. Pour cette raison, les méthodes fréquentielles ne sont pas utilisées en pratique car la charge polluante peut généralement varier rapidement au cours du temps [19].

- Identification dans le domaine temporel :

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes fréquentielles. Le principe de ce type de méthodes est la séparation du fondamental ou de certains harmoniques du reste des harmoniques par le filtrage [18].

Dans un premier temps, nous présentons la méthode classique (méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées) utilisée pour l'extraction des courants harmoniques se basant sur un filtre basse bande. Ensuite nous entamons la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée se basant sur un filtre mult-ivariable.

II.2. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Méthode des puissances active et réactive instantanées p-q: l'extraction des harmoniques est réalisée à partir de la puissance instantanée calculée en repère fixe, en utilisant la transformée de Concordia [20], [21]. Ainsi, les puissances sont décomposées en une composante continue, liée au fondamental, et en une composante alternative, liée aux harmoniques, qui peuvent être séparées en utilisant un filtre passe-haut [18].

Le principe de cette méthode classique est maintenant succinctement décrit :

Notons respectivement par $(\mathcal{V}_\alpha, \mathcal{V}_\beta)$ et (i_α, i_β) les composantes orthogonales de Concordia associées aux tensions $\mathcal{V}_{sk}$ ($k = a, b, c$) et aux courants i_{ck} . La transformation de Concordia permet d'écrire, les deux relations suivantes [22]:

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

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

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q , sont définies par la relation matricielle suivante [20]:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{V}_\alpha & \mathcal{V}_\beta \\ -\mathcal{V}_\beta & \mathcal{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasées par leur homologues triphasées, nous obtenons :

$$p = \mathcal{V}_\alpha \cdot i_\alpha + \mathcal{V}_\beta \cdot i_\beta = \mathcal{V}_{sa} \cdot i_{ca} + \mathcal{V}_{sb} \cdot i_{cb} + \mathcal{V}_{sc} \cdot i_{cc} \quad (\text{II.4})$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$q = \mathcal{V}_\alpha \cdot i_\beta - \mathcal{V}_\beta \cdot i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}} [(\mathcal{V}_{sc} - \mathcal{V}_{sb})i_{ca} + (\mathcal{V}_{sa} - \mathcal{V}_{sc})i_{cb} + (\mathcal{V}_{sb} - \mathcal{V}_{sa})i_{cc}] \quad (\text{II. 5})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, ce qui nous permet d'écrire [22]:

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

Où :

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

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

L'inverse de l'équation (II.3) des puissances active et réactive permet d'établir la relation (II.7) des courants i_α et i_β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

En considérant les équations (II.6) et (II.7), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α, β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \left\{ \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \right\} \quad (\text{II.8})$$

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

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés $i_{ref\alpha}$ et $i_{ref\beta}$ par la transformation inverse de Concordia. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques [20].

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

Il est évident, d'après la relation (II.8), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelles et imaginaires doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant deux filtres, le premier pour isoler la partie p de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie q de la puissance réactive instantanée, comme le présente la Figure II.1.

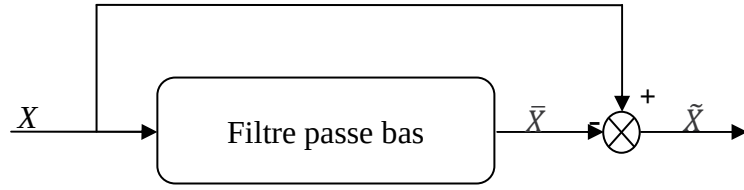


Fig. II.1 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

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

$$F_{pb}(s) = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\xi_0\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (\text{II.11})$$

Avec:

- $\omega_0^2 = 2\pi f_0$, f_0 est la fréquence de coupure du filtre ;
- s : l'opérateur de Laplace ;
- ξ_0 : dépassement.

Le schéma de la Figure II.2 illustre les différentes étapes permettant l'obtention des courants de référence par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

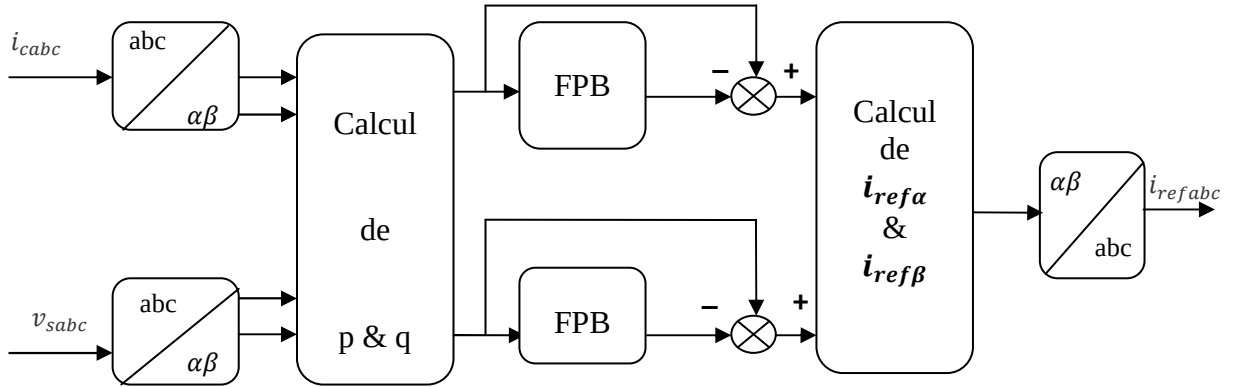


Fig. II.2 : Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées.

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux [22].

II.3. Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée

II.3.1. Principe du FMV

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes (α, β) [23]. La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante :

$$H(s) = \frac{\hat{x}_{\alpha\beta}(s)}{x_{\alpha\beta}(s)} = k \frac{(s+k) + j\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} \quad (\text{II.12})$$

Où ω_c est défini par :

$$\omega_c = \varepsilon \cdot n \cdot \omega_f \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- ω_c : la pulsation de coupure du filtre ;
- ω_f : la pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée ;
- n : le rang de la composante du signal à filtrer ;
- ε : une constante égale à ± 1 (composante directe ($\varepsilon=1$) ou inverse ($\varepsilon=-1$)) ;
- K : une constante positive ;
- $x_{\alpha\beta}(s)$: les signaux d'entrée du FMV (tension ou courant) ;
- $\hat{x}_{\alpha\beta}(s)$: les signaux de sortie du FMV.

A partir de l'équation (II.12) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes :

$$\hat{x}_\alpha(s) = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_\alpha(s) - \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_\beta(s) \quad (\text{II.14})$$

$$\hat{x}_\beta(s) = \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_\alpha(s) - \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + j\omega_c^2} x_\beta(s) \quad (\text{II.15})$$

Les équations (II.14) et (II.15) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{x}_\alpha(s) = \frac{k}{s} [x_\alpha(s) - \hat{x}_\alpha(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\beta(s) \quad (\text{II.16})$$

$$\hat{x}_\beta(s) = \frac{k}{s} [x_\beta(s) - \hat{x}_\beta(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_\alpha(s) \quad (\text{II.17})$$

La Figure II.3 présente le schéma bloc du filtre multi-variable.

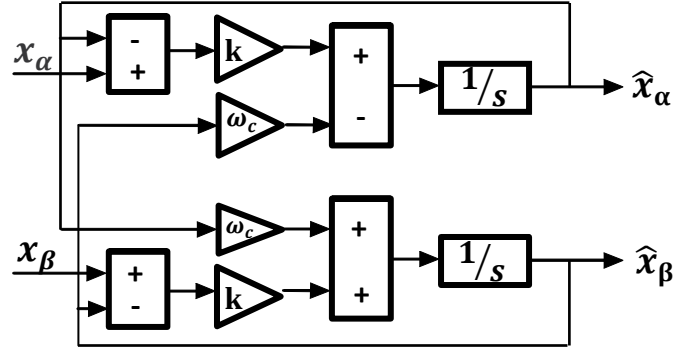


Fig. II.3 : Schéma bloc du FMV.

II.3.2. Extraction des courants harmoniques

Contrairement aux filtres passe bas, les filtres multi-variables offrent la possibilité d'extraire d'une manière précise les courants harmoniques dans le repère (α, β) . La Figure II.4 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMVs.

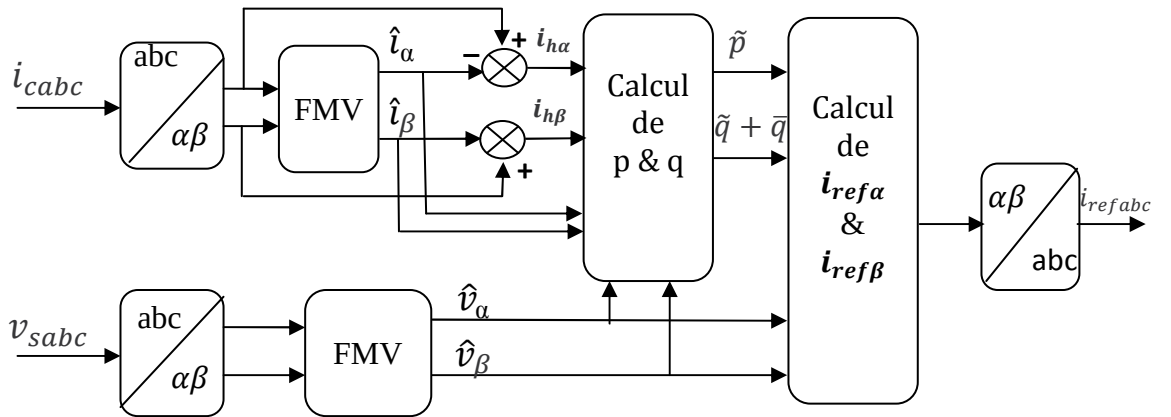


Fig. II.4 : Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées modifiée.

Quant aux courants diphasés d'axes (α, β) , ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} i_\alpha = \hat{i}_\alpha + i_{h\alpha} \\ i_\beta = \hat{i}_\beta + i_{h\beta} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées $\hat{v}_{\alpha\beta}$, et des courants harmoniques $i_{h\alpha\beta}$, nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle $\tilde{p}$ et imaginaire $\tilde{q}$ instantanées par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & \hat{v}_\beta \\ -\hat{v}_\beta & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Avec $i_{h\alpha}$ et $i_{h\beta}$ définis par:

$$i_{h\alpha} = (i_{\alpha d} - \hat{i}_{\alpha d})(i_{\alpha inv} - \hat{i}_{\alpha inv}) \quad (\text{II.20})$$

$$i_{h\beta} = (i_{\beta d} - \hat{i}_{\beta d})(i_{\beta inv} - \hat{i}_{\beta inv}) \quad (\text{II.21})$$

La composante fondamentale de la puissance réactive instantanée est définie par :

$$\bar{q} = \hat{v}_\beta \hat{i}_\alpha - \hat{v}_\alpha \hat{i}_\beta \quad (\text{II.22})$$

Après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance active p_{dc} nécessaire à la régulation de la tension continue v_{dc} , les courants de référence selon les axes (α, β) sont calculés par :

$$i_{ref\alpha} = \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2}(\tilde{q} - p_{dc}) + \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2}(\tilde{q} - \bar{q}) \quad (\text{II.23})$$

$$i_{ref\beta} = \frac{\hat{v}_\beta}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2}(\tilde{q} - p_{dc}) + \frac{\hat{v}_\alpha}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2}(\tilde{q} - \bar{q}) \quad (\text{II.24})$$

En substituant les équations (II.19) et (II.22) dans les équations (II.23) et (II.24), nous obtenons :

$$i_{ref\alpha} = i_{h\alpha} + i_{q\alpha} + i_{c\alpha} \quad (\text{II.25})$$

$$i_{ref\beta} = i_{h\beta} + i_{q\beta} + i_{c\beta} \quad (\text{II.26})$$

Où $i_{q\alpha}$, $i_{q\beta}$, $i_{c\alpha}$ et $i_{c\beta}$ sont définis par :

$$\begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} 0 & -\hat{v}_\beta \\ 0 & \hat{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{v}_\alpha & 0 \\ \hat{v}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Les courants de référence obtenus à partir des équations (II.25) et (II.26) contiennent trois termes

- Le premier terme correspond aux composantes harmoniques, directes et inverses ;
- Le deuxième terme est le courant réactif destiné à compenser la puissance réactive;
- Le troisième terme est le courant actif destiné à maintenir la tension v_{dc} égale à sa valeur de référence $v_{dc\text{ref}}$.

Grâce à la transformation de Concordia inverse, les équations (II.25) et (II.26), permettent de déduire les trois courants de référence [22].

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants harmoniques. La tension appliquée dans la méthode d'identification est une tension triphasée fournie par le réseau. La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), pour que la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées soit applicable. Dans sa forme classique, cette ne permet pas la détermination d'un courant harmonique d'un rang particulier. Etant donné que la tension du réseau est souvent déséquilibrée et/ou déformée et afin de généraliser l'application de cette méthode pour l'adopter à tout type de tension, nous proposons une méthode d'extraction des courants harmoniques basée sur l'utilisation d'un FMV.

Chapitre III

Simulation et interprétations des résultats

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter une analyse par simulation numérique sous l'environnement Matlab/Simulink de deux méthodes d'identification des courants harmoniques en comparant les résultats obtenus.

III.2. Résultats de simulation

Dans un premier temps, nous avons modélisé puis simulé un réseau électrique triphasé équilibré avec une charge non-linéaire du type pont redresseur triphasé tous diodes alimentant une charge RL.

Puis, nous avons étudié l'influence d'une tension triphasée déséquilibrée sur l'identification des courants harmoniques.

Les simulations ont été réalisées avec un réseau 220V (efficace, phase-neutre), 50Hz, résistance de ligne $R_s = 0.25 \text{ m}\Omega$, inductance de ligne $L_s = 19.4 \text{ }\mu\text{H}$, charge polluante avec une charge inductive continue $R = 30\Omega$, $L = 1\text{mH}$.

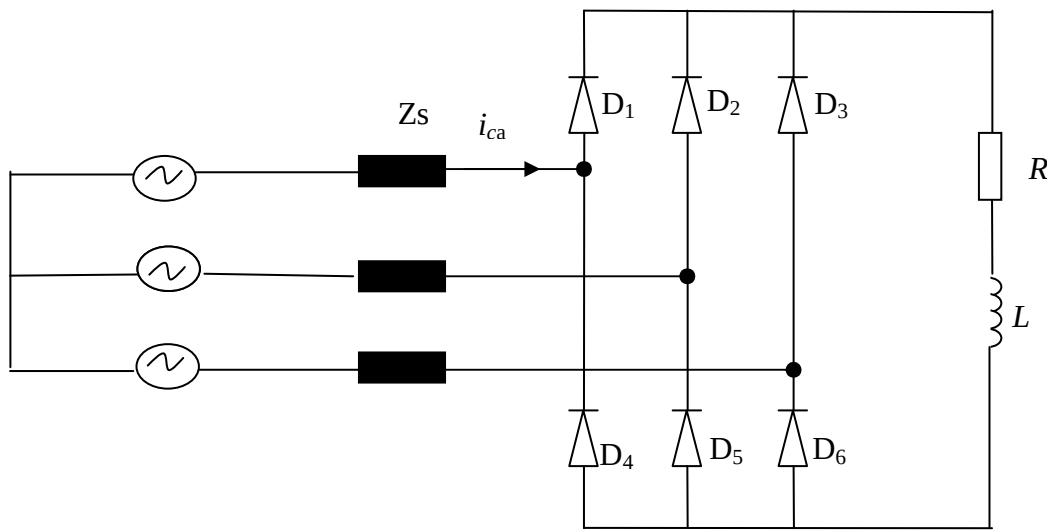


Fig. III.1 : Source triphasés et une charge non linéaire

III.2.1. Cas d'une tension de source équilibrée

La Figure III.2 illustre les tensions de source et courant de charge (phase 1). Le THD (Total Harmonic Distortion) en courant pour cette charge est de 30.36%. La Figure III.3 représente les résultats de simulation obtenus par les deux méthodes pour des tensions de source équilibrées. Le THD du signal ($i_{c1} - i_{ref1}$) obtenu pour la méthode p-q est égal à 1.22% et pour la méthode p-q modifiée est égal à 0.49%.

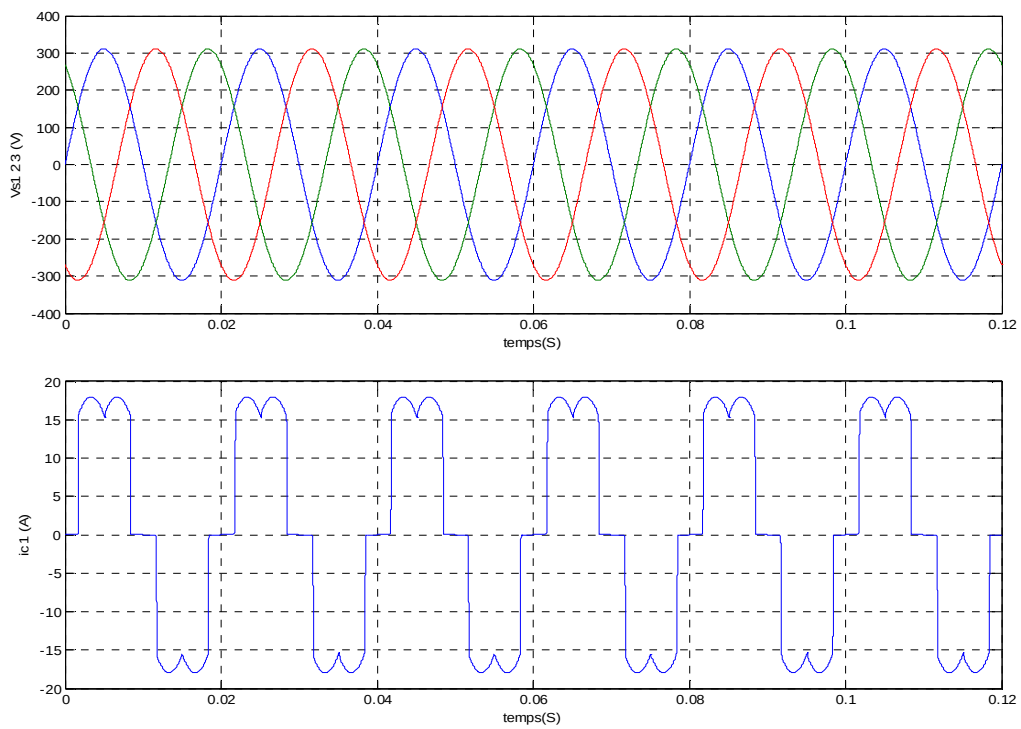


Fig.III.2 : Tensions de source et courant de charge (phase 1).

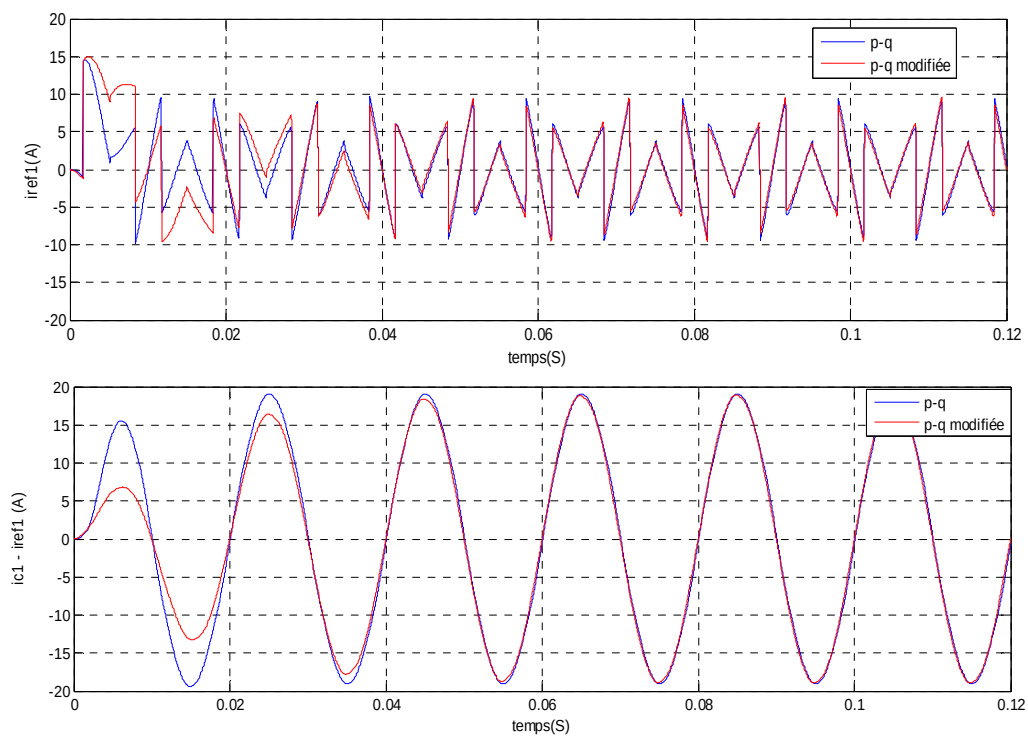
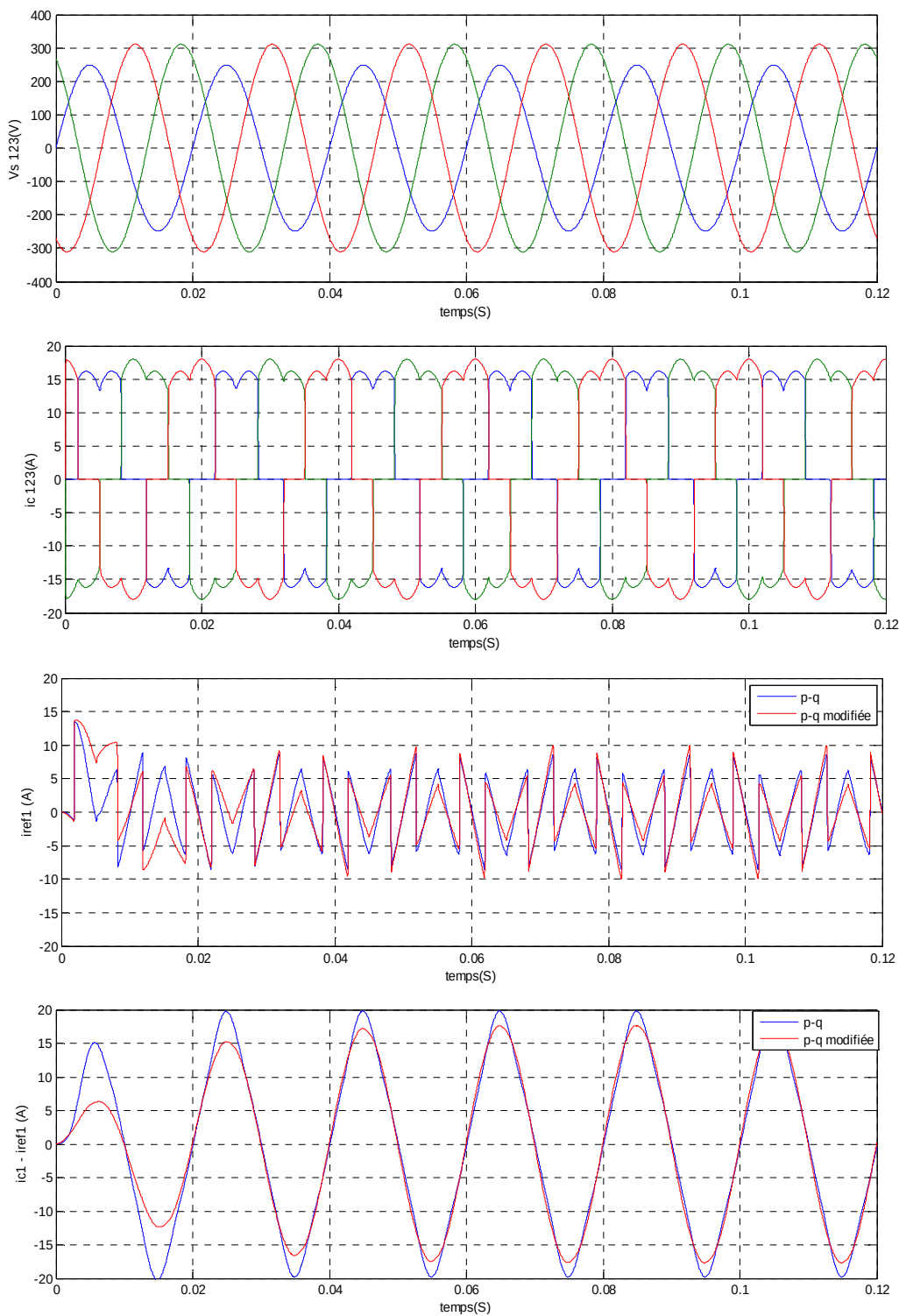


Fig. III.3 : Résultats de simulations pour les deux méthodes (phase 1).

III.2.2. Cas d'une tension de source déséquilibrée

Afin de tester les performances des deux méthodes sous une tension perturbée du réseau électrique, on étudie le cas d'un réseau déséquilibré. La Figure III.4 représente les résultats de simulation obtenus par les deux méthodes d'identification dans ces conditions.



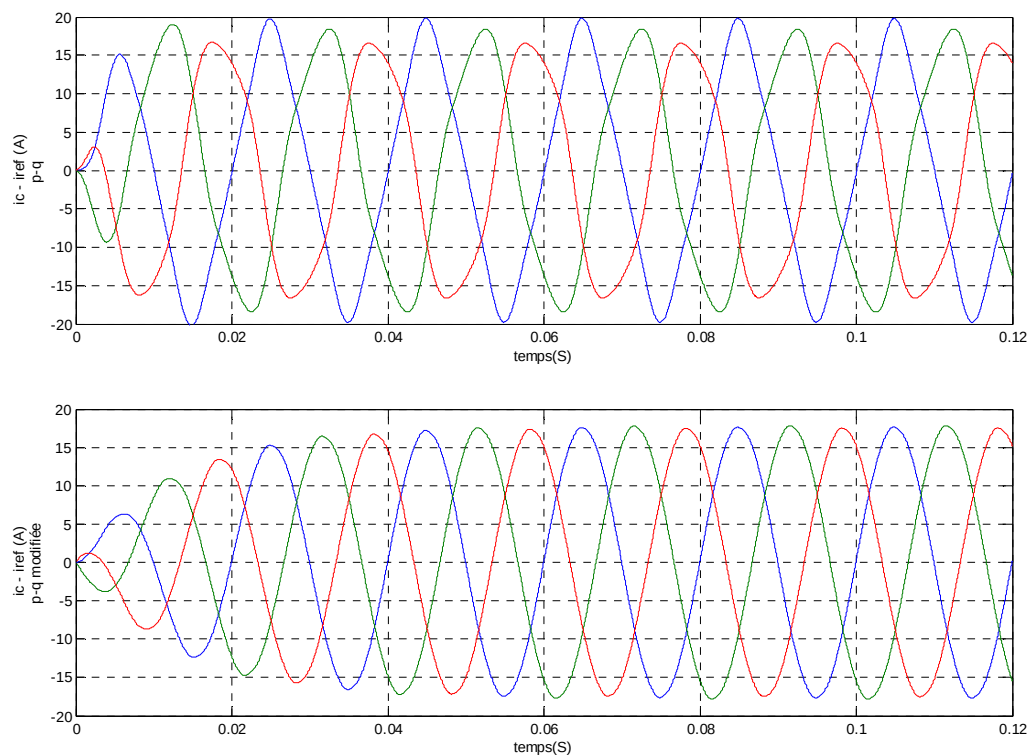


Fig. III.4 : Résultats de simulations pour les deux méthodes (phase 1).

Le tableau ci-dessous présente la synthèse des résultats des différentes simulations obtenus pour les deux méthodes lorsque les tensions de source sont déséquilibrées.

Tableau III.1. THDs des courants i_c et $(i_c - i_{ref})$ lorsque les tensions de source sont déséquilibrées.

Phase	V_s (V)	THD (%) i_c	THD (%) ($i_c - i_{ref}$)	
			p-q	p-q modifiée
1	276	34.66	8.31	0.52
2	220	28.47	8.93	0.54
2	220	27.47	9.55	0.53

On constate que la méthode $p-q$ modifiée donne de meilleurs résultats, dont un plus petit taux de distorsion.

III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par présenter la simulation de l'ensemble constitué d'un réseau, d'une charge polluante (redresseur triphasé). Puis, nous avons montré l'influence de la tension du réseau sur le THD. Nous avons également remarqué que la méthode $p-q$ modifiée permet d'obtenir de bonnes performances même si la tension du réseau est perturbée.

Conclusion Générale

Dans ce travail, nous avons étudié par simulation numérique en utilisant le MATLAB l'identification des courants harmoniques. Notre objectif est de réaliser une comparaison entre deux techniques pour déterminer les courants harmoniques. Pour atteindre ce but, nous avons présenté en premier temps les effets liés à la connexion des dispositifs d'électronique de puissance sur la qualité de l'énergie électrique. Des solutions ont été proposées permettant pour remédier à chaque type de perturbation.

Par la suite, nous avons développé les deux techniques pour déterminer les courants harmoniques : méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée. La première méthode nécessite des tensions de réseau saines pour identifier correctement les harmoniques du courant de charge. Or, les tensions du réseau sont souvent affectées par les courants harmoniques de la charge, pour y palier nous avons opté pour la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées modifiée.

Enfin, après une étude comparative basée sur de critère de taux de distorsion des courants fondamentaux (THD), nous avons remarqués la supériorité de la deuxième méthode par rapport l'autre.

Références

Bibliographiques

- [1] Haddad Salim " Gestion de la qualité électrique dans un réseau de transmission ", Thèse Doctorat, 2010.
- [2] Djaffar Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension", Thèse Doctorat Université de Haute-Alsace, 2005.
- [3] Boukadoum Aziz, "Contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique", Mémoire de Magister Université de Annaba, 2007.
- [4] V. Ignatova, "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique : application aux creux de tension et à la pollution harmonique", Thèse Doctorat, Université de Grenoble, 2006.
- [5] C. Fetha, "Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique", Thèse Doctorat, Université de Batna, 2006.
- [6] Steeve Beaulieu, "Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmonique en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique", Université du Québec Chicoutimi, mai 2007.
- [7] Sanae Rechka, "Étude de méthodes de filtrage des harmonique dans les réseaux électriques de distribution ", Université du Québec à Trois-Rivières, Avril 2002.
- [8] A. Arora, "Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique", Revue qualité de l'énergie électrique ABB 3/1998.
- [9] K.J.P. Mqcken, " Mitigation of voltage dips through distributed generation systems", IEEE Transactions on Industry Applications, pp.1686-1693, Vol.40, No.6, November/December 2004.
- [10] Nekkar Djamel "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs Triphasés", Mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.
- [11] Mohamed Muftah Abdesalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", Thèse Docteur l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [12] H. Kouara, " Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2006.
- [13] M.M. Swamy, " Passive techniques for reducing input current harmonics", WP.AFD.01 Yaskawa Electric America, 2005.
- [14] A. Hamadi " Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilises pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution", Thèse Doctorat, Université du Québec 2010.
- [15] Bouafia Abdelouahab, " Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: Application aux redresseurs a MLI “, Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas-Setif, 2010.
- [16] Y. Abdelli, "Etude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique", Thèse de doctorat de l'université de Nantes, Nantes, 2005.

- [17] Q. Chen, Z. Chen and M. McCormick, « the application and optimization of C-type filter in a combined harmonic power filter ». 35th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [18] Chennai Salim, "Etude, modélisation et commande des filtres actifs : Apport des Techniques de l'intelligence artificielle", Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra ,2013.
- [19] Shahram Karimi, "Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009.
- [20] Alali Mohamed Alaa Edin, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur ULP, 2002.
- [21] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits", in Proceeding International Power Electronics Conference. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386, 1983.
- [22] Mesbahi Nadhir, "Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution", Thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba, 2014.
- [23] M. C. 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 Henri Poincaré, Nancy-I, Décembre 2004.