

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR UNIVERSITY-ANNABA -  
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA-



جامعة باجي مختار  
- عنابة -

Année : 2015

Faculté des Sciences de l'Ingéniorat  
Département d'Electrotechnique

## THESE

*Présentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT en Sciences*

# Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique

Option

*Réseaux électriques*

Par

*CHELLI Zoubir*

Directeur de Thèse : OMEIRI Amar      Prof.      Université de Annaba

### Devant le Jury

Président :	Pr. OUARI Ahmed	Prof.	Université de Annaba
Rapporteur :	Pr. OMEIRI Amar	Prof.	Université de Annaba
Co-encadreur :	Dr. TOUFOUTI Riad	MCA	Université de Souk Ahras
Examineurs :	Pr. LABAR Hocine	Prof.	Université de Annaba
	Dr. LEMZADMI Ahcene	MCA	Université de Guelma
	Pr. KHELIL Khaled	Prof.	Université de Souk Ahras
Invité :	Pr. SAAD Salah	Prof.	Université de Annaba

# ملخص

إن مشكلة التلوث بالتوافقيات في شبكات التوزيع الكهربائية هي في تفاقم مقلق خاصة مع تزايد استعمال المحولات غير الخطية. التصفية الفعالة هي واحدة من بين أنجع الحلول المقترحة للتصدي لهذه المشكلة. إن مساهمتنا في هذا الميدان، من خلال هذه الرسالة، تكمن في تطوير تقنية تحكم معتمدة على اقتراح خطة للمراقبة لتحسين أداء مصفى فعال ثلاثي الأطوار. في البداية قمنا بمراجعة أدبية المصافي الفعالة ذات القدرة ثم قمنا بدراسة التلوث التوافقي. بعد ذلك عرضنا استراتيجيات مكافحة التلوث و الطرق الأكثر شيوعاً في حساب المقادير المرجعية، كما عرضنا تقنيات التحكم الأكثر استعمالاً. بالإضافة إلى ذلك تعرفنا إلى كيفية تصميم دارات تعديل تيار و توتر المصافي الفعالة ذات القدرة. الخطوة التالية تضمنت طرق تحديد وتقنيات المراقبة مع تطبيقات برمجية لمصافي فعالة متوازية ثلاثية الأطوار. صحبت هذه التطبيقات بمناقشات و مقارنات. أما آخر مرحلة فقد شملت من جهة تطبيق تقنية نظام الرقابة المقترح قصد الحصول على المزيد من الجودة في عملية التصفية؛ و من جهة أخرى فقد اشتملت على مقارنة هذا النهج مع الطريقة التقليدية، النتائج التي تم التوصل لها أثبتت فعالية الخطة المقترحة، المطبقة على المحولات غير الخطية المتوازنة و غير المتوازنة.

# Résumé

Le problème de la pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution devient de plus en plus préoccupant avec l'accroissement de l'usage des charges non-linéaires. Le filtrage actif de puissance est l'un des solutions les plus efficaces face à ce problème. La contribution qu'apporte cette thèse, dans le champ du filtrage actif, consiste au développement d'une stratégie de commande basée sur un schéma de contrôle proposé pour améliorer les performances du filtre actif triphasé. Au départ, on a établi un état de l'art des filtres actifs. Ensuite, on a présenté une étude de la pollution harmonique. Après, on a présenté les stratégies de dépollution et les algorithmes les plus répandus d'identification des grandeurs harmoniques de référence, et on a énuméré les techniques de commande les plus utilisées. En outre, on a montré comment se fait la conception des circuits de régulation du courant et de la tension d'un filtre actif de puissance. Après, nous présenterons la description des méthodes d'identification des harmoniques en utilisant un onduleur de tension à trois niveaux, des tests de simulation du système, de chacune des méthodes d'identification. Des commentaires et des discussions comparatives ont été fournis. Dans une dernière étape, on a d'une part appliqué la technique de commande proposée afin d'obtenir en plus de l'amélioration de la qualité de filtrage, et d'autre part, on a effectué une comparaison entre la stratégie de commande proposée et la technique d'identification conventionnelle, les résultats obtenus ont prouvé l'efficacité du plan proposé, appliqués aux charges non linéaires équilibrée et déséquilibrée.

# Abstract

The problem of harmonic pollution in distribution electrical networks is becoming more and more worrying with the increasing use of nonlinear loads. Active power filtering is one of the most effective solutions to this problem. The contribution that brings this thesis, to active filtering field, consists on the development of a control strategy based on proposed control scheme to improve the performance of the three-phase active filter. At the beginning, we have established the state of the art of active power filters. Then we presented a study of the harmonic pollution. After what, we presented the most popular references identification algorithms, and enumerated the most used control techniques. Besides, we showed how APFs current and voltage regulating circuits can be conceived. After we present the description of harmonic identification methods using a voltage inverter three level. Commentaries and comparative discussions were provided. In the last step, we have, on the one hand apply the control technique proposed in order to obtain in addition to improving the quality of filter, and in the other hand associated an this approach is compared to the conventional shunt APF reference compensation strategy. The developed algorithm's validated by simulation tests. The obtained results have demonstrated the effectiveness of the proposed scheme and confirmed the theoretical developments for balanced and unbalanced nonlinear loads.

# Dédicaces

**Il m'est difficile d'exprimer tout ce que je dois à ma famille. Je pense particulièrement à ma**

**Mère et ma Femme pour l'inestimable soutien moral et logistique et les nombreux**

**encouragements que j'ai toujours reçue de leur part.**

# Remerciements

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m’avoir appris ce que j’ignorais, de m’avoir donné la santé et tout dont je nécessitais pour l’accomplissement de cette thèse.

Je remercie, en deuxième position, ma chère mère, ma femme et mes enfants Abdlmouhaimen Chames Eddine et Abderazak, sans lesquelles je n’aurai jamais pu arriver à terme dans la rédaction, et qui m’ont toujours entouré d’affection et de soutien dans les moments pénibles comme dans les moments de joie.

Egalement, je remercie le directeur de thèse Professeur Omeiri Amar pour son encadrement, ses directives et sa disponibilité. Aussi, je le remercie pour ses encouragements, son indulgence, et sa sympathie tout au long des années de travail.

Ma gratitude s’exprime pareillement pour Dr. Toufouti Riad co-rapporteur, pour sa générosité et son dévouement, et d’avoir sacrifié du temps de ses vacances lorsque je lui ai demandé d’intervenir au niveau de la correction linguistique du manuscrit.

Je remercie Monsieur Ahmed Ouari, Professeur à l’Université Badji Mokhtar–Annaba, de m’avoir fait l’honneur de présider le jury de soutenance.

Je remercie Monsieur Hocine Labar, Professeur à l’Université Badji Mokhtar – Annaba et Monsieur Ahcene Lemzadmi, Maître de conférence à l’Université de 08 Mai 1945 – Guelma et Monsieur Khelil Khaled Professeur à l’Université Med Chérif Messaadia – Souk Ahras, pour m’avoir fait l’honneur de participer au jury de soutenance et pour la pertinence de leurs remarques avisées, qui vont permettre l’amélioration de la qualité du manuscrit et l’essor vers de nouvelles perspectives.

En outre, je remercie Professeur Saad Salah, qu’i m’a tant conseillé, aidé et guidé chaque fois que je lui faisais appel, malgré ses nombreuses occupations.

Enfin, je ne peux oublier de remercier mes amies, mes collègues de département Génie électrique, enseignants, techniciens, agents administratifs, tous mes étudiants de l’université Mohamed Chérif Messaadia Souk Ahras pour leurs sincères souhaits de succès.

# LISTE DES FIGURES

Fig. 1.1 -	Système de contrôle du filtre active de puissance.....	7
Fig. 1.2 -	Génération des courants de référence par l'algorithme de la séquence positive du fondamental.....	9
Fig. 1.3 -	Schéma de la CSD à FPU.....	11
Fig. 2.1 -	Creux de tension.....	16
Fig. 2.2 -	Coupures brèves.....	17
Fig. 2.3 -	Phénomène du Flicker.....	17
Fig. 2.4 -	Déséquilibre de tension.....	18
Fig. 2.5 -	Surtensions transitoires.....	18
Fig. 2.6 -	Harmoniques de tension.....	19
Fig. 2.7 -	Source de tension harmonique.....	26
Fig. 2.8 -	Impédance harmonique.....	27
Fig. 2.9 -	Diagramme de Fresnel des puissances.....	30
Fig. 2.10 -	Circulation des courants harmoniques d'ordre 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre.....	33
Fig. 2.11 -	Four à arc alimenté en courant alternatif.....	34
Fig. 2.12 -	Four à arc alimenté en courant continu.....	35
Fig. 2.13 -	Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.....	37
Fig. 3.1 -	Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3.....	45
Fig. 3.2 -	Montage de 2 ponts redresseurs.....	46
Fig. 3.3 -	Principe de connexion du filtre actif.....	46
Fig. 3.4 -	Filtre actif parallèle.....	47
Fig. 3.5 -	Filtre actif série.....	48
Fig. 3.6 -	Combinaison d'un filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle.....	49
Fig. 3.7 -	Mise en série d'un filtre actif série avec un filtre passif parallèle.....	50
Fig. 3.8 -	Combinaison d'un filtre actif parallèle avec un filtre actif série : Conditionneur actif de puissance.....	50
Fig. 3.9 -	Schéma de principe de convertisseur à MLI.....	51
Fig. 3.10 -	Système IPQC.....	52
Fig. 3.11 -	Système PLC.....	52
Fig. 4.1 -	Les techniques d'identification des harmoniques.....	57
Fig. 4.2 -	Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q.....	61
Fig. 4.3 -	Principe de la méthode (pq).....	61
Fig. 4.4 -	Représentation vectoriel de passage de repère abc vers le repère (dq).....	62
Fig. 4.5 -	Principe de la méthode (dq).....	64
Fig. 4.6 -	Principe de la méthode (pqr).....	64
Fig. 4.7 -	Relation entre le plan ( $\alpha\beta 0$ ) et le plan (pqr).....	65
Fig. 4.8 -	Schéma de la stratégie de contrôle proposée.....	68
Fig. 5.1 -	Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension.....	72
Fig. 5.2 -	Filtre actif à structure tension.....	73
Fig. 5.3 -	Principe de commande par MLI.....	76
Fig. 5.4 -	Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur.....	77
Fig. 5.5 -	Principe de la commande du courant par hystérésis.....	78
Fig. 5.6 -	Modèle simplifié d'un contrôle de bande d'hystérésis.....	78
Fig. 5.7 -	Modèle de simulation établi sous Simulink.....	80
Fig. 5.8 -	Les tensions de la source avant l'insertion du filtre actif.....	80
Fig. 5.9 -	Zoom des tensions de la source avant l'insertion du filtre actif.....	81
Fig. 5.10 -	Les courants de la source avant l'insertion du filtre actif.....	81

Fig. 5.11 - Zoom des courants de la source avant l'insertion du filtre actif.....	<b>82</b>
Fig. 5.12 - Les courants de la charge non linéaire avant l'insertion du filtre actif.....	<b>82</b>
Fig. 5.13 - Les courants de la charge déséquilibrée avec le neutre avant l'insertion du filtre actif...	<b>83</b>
Fig. 5.14 - Les courants de la charge totale avant l'insertion du filtre actif.....	<b>83</b>
Fig. 5.15 - Spectre harmonique de courant de la charge phase-a- avant filtrage.....	<b>84</b>
Fig. 5.16 - Spectre harmonique de courant de la charge phase-b- avant filtrage.....	<b>84</b>
Fig. 5.17 - Spectre harmonique de courant de la charge phase-c- avant filtrage.....	<b>85</b>
Fig. 5.18 - Courant du filtre actif parallèle commandé par la théorie proposée.....	<b>86</b>
Fig. 5.19 - Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle de la phase -a.....	<b>86</b>
Fig. 5.20 - Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle de la phase -b.....	<b>87</b>
Fig. 5.21 - Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle de la phase -c.....	<b>87</b>
Fig. 5.22 - Spectre harmonique de courant de la source phase-a- avec filtrage.....	<b>88</b>
Fig. 5.23 - Spectre harmonique de courant de la source phase-b- avec filtrage.....	<b>88</b>
Fig. 5.24 - Spectre harmonique de courant de la source phase-c- avec filtrage.....	<b>89</b>

# LISTE DES TABLEAUX

TAB.2.1 - Conséquences d'une exposition à long terme aux harmoniques.....	22
TAB.2.2 - Harmoniques dans un système triphasé équilibré.....	32
TAB.2.3 - Conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau.....	39
TAB.2.4 - Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques.....	41
TAB.3.1 - Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source.....	44
TAB.5.1- Tensions en sortie de l'onduleur.....	74
TAB.5.2- Paramètres du système.....	79
TAB.5.3- Les résultats comparatifs du THD.....	90

# LISTE DES SYMBOLES

<b>FAP</b>	Filtre Actif Parallèle
<b>THD</b>	Total Harmonic Distorsion
$V_s$	Tension de source
$i_s$	Courant de source
$p$	Puissance instantané active
$q$	Puissance instantané réactive
$P_{avg}$	power average
$V_{dc}$	Tension continue de l'onduleur
<b>h</b>	Rang de l'harmonique
$i_f$	Courant de filtre
$i_l$	Courant de charge
$i_{ref}$	Courant de référence
$R_f$	Résistance de filtre de sortie
$L_f$	Inductance de filtre de sortie
<b>UPQC</b>	Unified Power Quality Conditioner
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<b>FFT</b>	Fast Fourier Transform
<b>FPB</b>	Filtre Passe-Bas
<b>PLL</b>	Phase Locked Loop
<b>PI</b>	Proportional Integral
<b>GTO</b>	Gate Turn Off.
<b>MOSFET</b>	Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor
<b>IGBT</b>	Insolated Gate Bipolar Transistor
<b>GRV</b>	Génératrices à Reluctance Variable
<b>GADA</b>	Génératrice Asynchrone Double Alimentation
<b>IPQC</b>	Improved Power Quality AC-DC Converter
<b>PLC</b>	Power Line Communication

# Table des Matières

<b>INTRODUCTION GENERALE.....</b>	<b>1</b>
<b>I ETAT DE L'ART DES FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE</b>	<b>4</b>
I.1 INTRODUCTION.....	4
I.2 ETAT DE L'ART DES FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE.....	4
I.2.1 H.SASAKI ET T. MACHIDA 1971.....	4
I.2.2 GLORIA Y ET E.C. STRYCUDA 1976.....	4
I.2.3 ARRILLAGA, J 1983.....	5
I.2.4 H. AKAGI 1986, 1996.....	5
I.2.5 V. ABURTO ET M. SCHNEIDER 1997.....	5
I.2.6 SVENSSON, JAN ET OTTERSTEN, ROLF 1999.....	6
I.2.7 INGRAM, DAVID ME ET ROUND, SIMON D.A 1999.....	6
I.2.8 SINGH, BHIM ET AL-HADDAD, KAMAL 1998.....	6
I.2.9 YUAN, XIAOMING ET ALLMELING, JOST 2000.....	7
I.2.10 CANO, JOSE MANUEL ET ORCAJO, GONZALO ALONSO 2001.....	8
I.2.11 BOLLEN, MATH HJ ET ZHANG, L. D 2003.....	8
I.2.12 CHANG, GARY W. ET SHEE, TAI-CHANG 2004.....	8
I.2.13 MATTAVELLI, PAOLO 2005.....	9
I.2.14 JIN, TAOTAO, WEN, JUN, ET SMEDLEY, KEYUE 2005.....	9
I.2.15 BENMEDDOUR, M. ET BOUMAHRAZ, M 2007.....	10
I.2.16 RACHMILDHA, TRI D 2008.....	11
I.2.17 OUNEJJAR, YOUSSEF ET AL-HADDAD, KAMAL 2009.....	11
I.2.18 HOOSHMAND, RAHMAT ALLAH 2011.....	12
I.2.19 RAHMOUNI, A 2012.....	12
I.2.20 MESBAHI, NADHIR ET OUARI, AHMED 2014.....	12
I.3 CONCLUSION.....	12
<b>II ETUDE DE LA POLLUTION HARMONIQUE.....</b>	<b>14</b>
II.1 INTRODUCTION.....	14
II.2 OBJECTIFS.....	14
II.3 DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS ELECTRIQUES.....	14
II.3.1 Creux de tension & coupures brèves.....	15
II.3.2 Fluctuations de tension & flicker.....	15
II.3.3 Déséquilibre de tension.....	16
II.3.4 Surtensions transitoires.....	17
II.3.5 Harmoniques & inter-harmoniques.....	18
II.4 PERTURBATIONS HARMONIQUES.....	20

II.4.1	Nature physique du phénomène.....	20
II.4.2	Identification des harmoniques.....	20
II.4.3	Définitions & aspects théoriques des phénomènes.....	22
II.4.3.1	Harmoniques d'un signal périodique.....	22
II.4.3.2	Décomposition en série de Fourier.....	23
II.4.3.3	Analyse d'un signal.....	24
II.4.3.4	Pourcentage d'harmoniques.....	25
II.4.4	Harmoniques de courant & de tension.....	25
II.4.4.1	Courant harmonique.....	25
II.4.4.2	Tension harmonique.....	25
II.4.4.3	Loi d'Ohm généralisée & impédance harmonique.....	26
II.4.5	Distorsion harmonique.....	26
II.4.5.1	Taux harmonique de rang h : THH.....	26
II.4.5.2	Taux global de distorsion harmonique : THD.....	27
II.4.5.3	Taux de distorsions pondérées : TDP.....	28
II.4.6	Facteur de puissance.....	28
II.4.7	Harmoniques dans un système triphasé.....	31
II.4.7.1	Système triphasé équilibré.....	31
II.4.7.2	Système triphasé déséquilibré.....	32
II.4.8	Interharmoniques.....	33
II.4.8.1	Charges non linéaires produisant les interharmoniques.....	33
II.4.8.2	Signaux de télécommande de 175 [Hz] sur les réseaux de distribution.....	34
II.5	ORIGINE DES PERTURBATIONS HARMONIQUES.....	35
II.5.1	Appareils de production, de transport & de distribution.....	35
II.5.2	Secteur industriel.....	35
II.5.3	Secteur tertiaire.....	36
II.5.4	Secteur domestique.....	36
II.6	CONSEQUENCES DES PERTURBATIONS HARMONIQUES.....	37
II.6.1	Échauffement.....	37
II.6.2	Interférences avec les réseaux de télécommunication.....	38
II.6.3	Excitation des résonances.....	38
II.6.4	Mauvais fonctionnement pour les dispositifs électriques.....	38
II.6.5	Autres effets.....	38
II.7	NORMES & REGLEMENTATION.....	40
II.8	CONCLUSION.....	42
<b>III</b>	<b>STRATEGIES DE DEPOLLUTION DES HARMONIQUES.....</b>	<b>43</b>
III.1	INTRODUCTION.....	43
III.2	SOLUTIONS TRADITIONNELLES.....	43

III.2.1	Surdimensionnement de l'installation électrique.....	43
III.2.2	Augmentation de la puissance de court-circuit.....	43
III.2.3	Transformateur à couplage spécial.....	44
III.2.4	Modification du convertisseur polluant.....	45
III.2.4.1	Redresseurs dodécophasés.....	45
III.2.4.2	Méthodes d'injection d'harmonique dans le neutre.....	45
III.2.4.3	Transformateurs de réjection de l'harmonique 3.....	46
III.3	SOLUTIONS NOUVELLES.....	46
III.3.1	Filtre actif ou conditionneur actif d'harmoniques.....	46
III.3.2	Filtre actif de puissance parallèle.....	47
III.3.3	Filtre actif de puissance série.....	47
III.3.4	Filtre actif de puissance hybride.....	48
III.3.4.1	Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles.....	49
III.3.4.2	Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles.....	49
III.3.4.3	Conditionneur actif de puissance.....	50
III.3.4.4	Redresseur à principe de la MLI.....	50
III.4	SOLUTIONS NON CONVENTIONNELLES.....	51
III.4.1	Système Improved Power Quality AC-DC Converter IPQC.....	51
III.4.2	Système Power Line Communication PLC.....	52
III.4.3	Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation..	53
III.5	CONCLUSIONS.....	53
<b>IV</b>	<b>METHODES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES DU FAP.....</b>	<b>55</b>
IV.1	INTRODUCTION.....	55
IV.2	TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES.....	56
IV.2.1	Identification dans le Domaine Fréquentiel .....	57
IV.2.1.1	Transformée de Fourier rapide (FFT).....	57
IV.2.1.2	Transformée de Fourier discrète (DFT).....	58
IV.2.1.3	Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR).....	58
IV.2.2	Identification dans le Domaine Temporel.....	59
IV.2.2.1	Théorie de la puissance instantanée (pq).....	59
IV.2.2.2	Théorie du référentiel synchrone (dq).....	61
IV.2.2.3	Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr)..	64
IV.2.2.4	Théorie proposée.....	68
IV.3	CONCLUSION.....	69
<b>V</b>	<b>ETUDES COMPARATIVES ENTRE LES METHODES DE COMMANDE</b>	<b>71</b>
V.1	INTRODUCTION.....	71
V.2	LA PARTIE PUISSANCE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE	

TENSION.....	71
V.2.1 L'onduleur de tension.....	72
V.2.2 Filtre de découplage.....	74
V.2.3 Système de stockage d'énergie.....	74
V.3 CONTROLE DES COURANTS DU FILTRE ACTIF (PARTIE COMMANDE).....	75
V.3.1 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	76
V.3.2 Commande par hystérésis.....	76
V.4 RESULTATS DE SIMULATION.....	79
V.4.1 Résultats de simulation du FAP.....	85
V.5 CONCLUSION.....	90

<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>91</b>
---------------------------------	-----------

<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>94</b>
---	-----------

**INTRODUCTION**  
**GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

L'utilisation de charges non linéaires, telles que des redresseurs à diodes ou thyristors, des alimentations à découpage, etc..., provoque l'injection d'une énorme quantité d'harmoniques de courant dans les réseaux de distribution. Ces harmoniques provoquent des distorsions de la forme de courant de la source ce qui conduit à des pertes additionnelles dans les transformateurs et dans les capacités des lignes, et des défauts de fonctionnement d'équipements électroniques sensibles.

Le fonctionnement normal de tous les producteurs et tous les consommateurs de l'énergie électrique réside dans la supposition que le courant et la tension du système triphasé soient sinusoïdaux et symétriques, par conséquent, il est nécessaire de réduire les harmoniques en dessous de 5% comme spécifié dans la norme harmonique IEEE519 [1].

Le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique impose, si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques.

Pour pallier aux problèmes de pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution plusieurs solutions ont été proposées pour limiter les harmoniques de courant injectés dans le réseau par des charges non linéaires, parmi elles : Les filtres passifs, qui sont souvent appelés filtres piègeurs d'harmoniques, ont été utilisés pour éliminer les harmoniques de courants et améliorer le facteur de puissance [2]. Malgré sa simplicité et son faible coût, le filtre passif est lié aux variations de l'impédance de la source et peut mener à une résonance non voulue avec le réseau. De plus, ce type de filtre présente une non- adaptabilité aux variations de la charge et du réseau.

Grâce aux progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine d'électronique de puissance et l'électronique numérique, ont permis de concevoir des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto-adaptables appelés filtrage actifs. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation de la qualité d'énergie.

Le filtre actif parallèle comporte deux fonctions principales ; une fonction d'identification de courants harmoniques et une fonction de commande d'onduleur pour injecter les courants de compensation. [3].

Ainsi, le choix de la topologie du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques.

Le principe de base des filtres actifs a été introduit par Sasaki et Machida au cours des années 70 [4]. Dès lors, l'intérêt y s'est renforcé d'une part par l'émergence de semi-conducteur de commutation, notamment les IGBT, et MOSFET caractérisés par une fréquence de commutation rapide et une structure à gâchette isolée [5,6], et de l'autre part, par la disponibilité des DSP, des FPGA, des convertisseurs analogiques/numériques, des capteurs de courant et de tension à de bons prix [7]. Un filtre actif de puissance est un convertisseur continu-alternatif (onduleur) dont la vocation est la reproduction de composantes harmoniques identiques à celles qu'on souhaite éliminer, mais en opposition de phase. En outre, les nouveaux filtres actifs sont supérieurs en qualité de filtrage, non volumineux, et plus flexibles en fonctionnement que leurs comparables passifs [8].

Dans ce contexte, cette thèse traite des différents aspects concernant la qualité de l'énergie électrique. Nous examinons les perturbations affectant la qualité de l'onde, les normes pour limiter l'émission des harmoniques et les principaux moyens de mitigation usuels. Nous développons des algorithmes et stratégies de commande des dispositifs de mitigation. Le travail présenté comporte cinq chapitres organisés comme suit :

■ Le premier chapitre contiendra un état de l'art et une révision de la littérature des filtres actifs.

■ Dans le deuxième chapitre, nous abordons en premier lieu les différents problèmes affectant la qualité de l'énergie électrique, ce qui tend à montrer leurs origines et leurs conséquences sur les installations. Nous focalisons le point sur celui des harmoniques, compte tenu de sa gravité avec la prolifération des charges non-linéaires.

■ Dans le troisième chapitre, nous décrivons les moyens de luttés et les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique existantes.

■ Le quatrième chapitre, représente l'objectif principal du travail présenté, où nous présenterons la description des méthodes d'identification des harmoniques à savoir : la méthode des puissances instantanées, la théorie de référentiel synchrone et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel et en fin la théorie proposée, car cette dernière est le fruit de notre contribution, en se basant sur la mesure des tensions et de la puissance instantanée de la source pour but générer les courants de référence.

Le cinquième chapitre, est consacré à l'étude comparative entre les méthodes de commande du filtre actif en utilisant un onduleur de tension à deux niveaux, pour but d'améliorer le contenu total d'harmonique (THD). Nous avons ensuite développé les principes de la commande du filtre actif à structure en tension dont la régulation de courant est assurée par la technique hystérésis modifiée associée à des bascule RS afin d'assurer des séquences de commutations très rapides des interrupteurs. Les stratégies de commande présentées précédemment (la méthode  $pq$  et la théorie proposée) ont été implantées numériquement sur l'environnement Matlab/Simulink.

Enfin, notre travail sera clôturé par une conclusion et quelques perspectives.

# Chapitre I

## *ETAT DE L'ART DES FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE*

## I.1- INTRODUCTION

La distorsion harmonique courant de réseau électrique est générée principalement par les charges non linéaires connectées au réseau (tels que les convertisseurs statique, les fours à arc, etc.). Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant. En Algérie, ce problème n'est pas pris en charge et risque dans quelques années d'avoir de gros problèmes liés aux perturbations harmoniques. Il est donc nécessaire de chercher les solutions les plus adéquates pour réduire et limiter la pollution harmonique des réseaux électriques.

Pour cette raison, des standards de restrictions d'harmoniques ont été recommandés pour limiter les harmoniques de courant injectés dans le réseau par des charges non linéaires.

## I.2- ETAT DE L'ART DES FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE

### I.2.1- H.SASAKI ET T. MACHIDA 1971 [4]

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour la compensation d'harmoniques dans les réseaux de puissance industriels depuis le principe de compensation proposé par H. Sasaki et T. Machida en 1971. Une nouvelle méthode d'élimination des courants harmoniques est proposée, qui est basée sur le principe de la compensation de flux magnétique dans un noyau de transformateur. Au moyen de la nouvelle méthode, les harmoniques anormaux ainsi que les harmoniques normaux peuvent être efficacement traitées.

### I.2.2- GLORIA Y ET E.C. STRYCULA 1976 [33]

Ont présenté une famille de filtres actifs parallèles et séries, et ont établi le concept de filtres actifs à base d'onduleurs MLI constitués de transistors de puissance. Cependant, ces filtres actifs n'ont pu être réalisés dans des systèmes réels vu que les dispositifs à forte puissance et à fréquence élevée étaient non disponibles lors des années 70. Ces filtres ont été développés pour éliminer les harmoniques générés par les convertisseurs utilisés dans les systèmes de transmission de courant continu en haute tension (HVDC). Toutefois, à cette époque la technologie des interrupteurs d'électronique de puissance ne permettait pas un développement applicatif significatif.

### I.2.3- ARRILLAGA, J 1983 [37]

L'auteur a appliqué le concept d'injection d'un courant modulé de forme spécifiquement appropriée au secondaire du transformateur d'alimentation. Ceci permet en effet d'aboutir à un courant de ligne à plusieurs niveaux, ce qui diminue considérablement son contenu harmonique.

### I.2.4- H. AKAGI 1986, 1996 [34, 35]

La stratégie de commande de filtres actifs de puissance à l'aide de dispositifs de commutation est proposée sur la base de la théorie de la puissance réactive instantanée. Cette démarche vise à d'excellentes caractéristiques de rémunération dans les états transitoires ainsi que des états stables. Le premier filtre actif parallèle de 800 kVA, composé d'un commutateur de courant à MLI et thyristors GTO, a été installé pour la compensation d'harmoniques Par la suite, de nombreux onduleurs de puissance commandés en MLI ont été développés pour des applications de filtrage actif. En conséquence, les filtres actifs parallèles ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde et surtout au Japon, où en 1996, il y avait plus de cinq cents filtres actifs parallèles installés avec des puissances allant de 50kVA à 2MVA.

### I.2.5- V. ABURTO ET M. SCHNEIDER 1997 [36]

Au cours de l'année 1997, la topologie multiniveaux a débuté aussi pour des applications de filtrage actif. L'auteur a présenté un filtre actif avec un onduleur de tension trois niveaux clampé par le neutre. Ce dernier pouvait compenser les courants harmoniques et la puissance réactive dans des systèmes de distribution moyenne tension. Aussi la référence [36] présente les principes de fonctionnement et critères de conception pour les deux circuits de puissance et de commande. Enfin, la viabilité du système proposé est représentée avec la simulation sous Matlab. Dès lors, l'intérêt aux filtres actifs multiniveaux, en vue de leur application industrielle en moyenne et forte puissance, n'a cessé de s'intensifier.

### I.2.6- SVENSSON, JAN ET OTTERSTEN, ROLF 1999 [38]

La référence [38] analyse le contrôle de courant d'un onduleur connecté au réseau. Pour cela, il utilise un correcteur PI en repère tournant avec un gain de type Dead-Beat. Par la suite, cette même structure de contrôle a été utilisée pour compenser les creux de tension dans un dispositif parallèle puis série.

### I.2.7-INGRAM, DAVID ME ET ROUND, SIMON D.A 1999 [39]

L'auteur propose l'utilisation du correcteur à Hystérésis numérique, un correcteur rapide, simple et robuste mais qui requiert des fréquences d'échantillonnage élevées pour se rapprocher des conditions de fréquence libre liées aux modes glissants idéaux.

### I.2.8-SINGH, BHIM ET AL-HADDAD, KAMAL 1998 [40]

Dans cet article, un nouveau système de commande d'un filtre actif de puissance triphasée (APF) est proposé d'éliminer les harmoniques, pour compenser la puissance réactive et le courant du neutre.

L'onduleur de tension est généralement préféré à cause de son meilleur rendement, de son moindre coût et de son volume plus réduit (si l'on compare le condensateur et l'inductance du côté continu). Par ailleurs, les modules à IGBTs disponibles actuellement sur le marché sont bien adaptés aux onduleurs de tension car en général une diode en antiparallèle est rajoutée pour chaque IGBT. Le commutateur de courant a quant à lui besoin de mettre en série avec chaque IGBT une diode anti-retour. De plus, un aspect vient clore provisoirement le choix : le commutateur de courant ne peut pas être utilisé avec des topologies multiniveaux classiques.

La nouvelle approche de contrôle pour le filtre actif triphasé a été démontrée leur efficacité, la Figure 1.1 illustre le système de contrôle du filtre active de puissance.

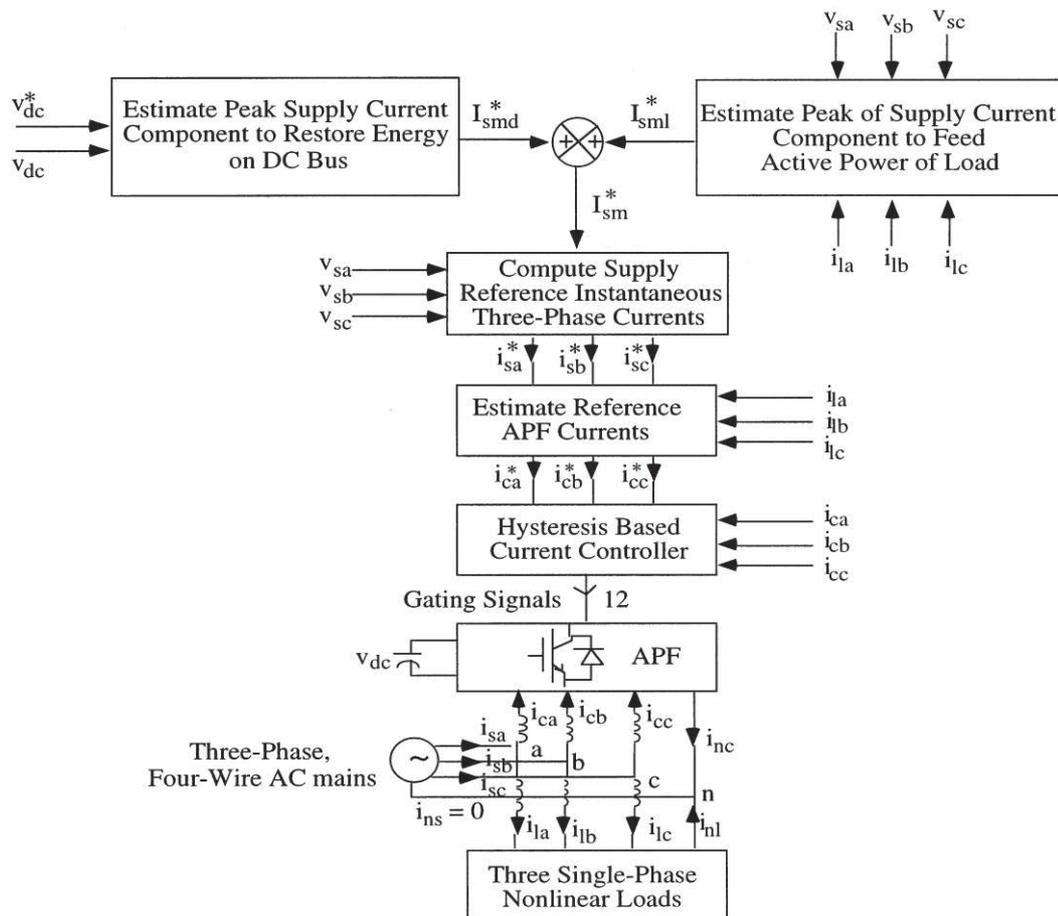


Fig.1.1- Système de contrôle du filtre active de puissance [40].

**I.2.9- YUAN, XIAOMING ET ALLMELING, JOST 2000[41]**

La structure multi-résonante a été proposée comme alternative à la structure PI en repères tournants multiples. En utilisant ce correcteur dans un repère fixe, l'implantation permet d'économiser considérablement les opérations liées aux transformations des repères multiples. Néanmoins, le correcteur étant lui-même plus complexe (du deuxième ordre), le gain en terme de volume de calcul est limité, surtout dans le cas d'une structure à neutre raccordé.

La structure de contrôle est bien adaptée pour les applications multi-fréquentielles, comme c'est le cas du filtrage actif. Les avantages les plus importants de ce type de structure de contrôle sont la robustesse et le fait qu'il garantit une erreur statique nulle pour les harmoniques considérés. Cependant, en général, ces correcteurs ont besoin d'un volume de calcul considérable.

**I.2.10- CANO, JOSE MANUEL ET ORCAJO, GONZALO ALONSO 2001 [42]**

L'auteur présente le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie du convertisseur est donné par deux fonctions de transfert : l'une reliant l'entrée à la sortie et l'autre la sortie à l'entrée.

Ce modèle peut être présenté également sous forme matricielle. Le transfert harmonique à travers le convertisseur est linéarisé par l'utilisation d'une matrice paramétrée, laquelle décrit les relations entre les harmoniques de rangs différents des deux côtés du convertisseur.

**I.2.11- BOLLEN, MATH HJ ET ZHANG, L. D 2003 [43]**

La méthode des 6 tensions consiste à comparer l'amplitude des trois tensions simples et des trois tensions composées normalisées. La tension, dont l'amplitude est la plus faible indique la phase ou les phases dont la chute de tension est la plus importante.

La méthode des six tensions permet de différencier les creux de tension monophasés, biphasés et triphasés. Cependant, il faut prévoir des cas particuliers dans l'algorithme afin d'analyser les creux de tension triphasés et les creux de tension biphasés de type E. En effet, les creux de tension de type E se caractérisent par trois tensions minimales : deux tensions simples et une tension composée. Dans le cas des creux de tension triphasés, les six tensions se caractérisent par la même amplitude.

La méthode a été reprise et modifiée durant ce travail de recherche de telle sorte qu'elle puisse classer correctement les creux de tension triphasés et les creux de tension de type E.

**I.2.12- CHANG, GARY W. ET SHEE, TAI-CHANG 2004 [44]**

C'est une technique proposée par W. G. Chang & T.-C. Shee. Elle est basée sur le besoin d'avoir un courant de source qui soit équilibré, non distordu et en phase avec la séquence positive de la tension de source. En conséquence, le filtre actif sera capable de réaliser :

- ✓ Un facteur de puissance unitaire à la séquence positive de la fréquence fondamentale
- ✓ Une puissance active minimale absorbée ou fournie par le filtre actif

- ✓ Une compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive
- ✓ Une compensation du courant du neutre.

Le principe de cet algorithme est illustré dans la Figure 1.2.

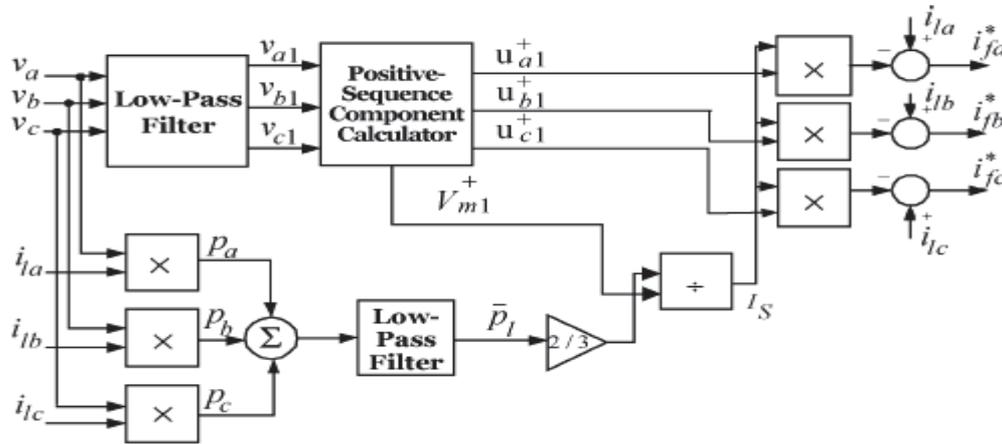


Fig. 1.2- Génération des courants de référence par l’algorithme de la séquence positive du fondamental [44].

### I.2.13- MATTAVELLI, PAOLO 2005[45]

L’auteur propose d’ajouter au système un observateur d’état. Avec un réglage adéquat des paramètres de l’observateur, les désagréments concernant les erreurs paramétriques liées au correcteur Dead-Beat sont minimisées, mais au prix d’une diminution légère de la dynamique du système et une augmentation de la complexité.

Dans [45], une source d’alimentation sans interruption (en anglais Uninterruptible Power Supply, UPS) est contrôlée avec une réponse Dead-Beat. Un correcteur par retour d’état est utilisé afin de placer les pôles du système à l’origine et donc, obtenir la réponse souhaitée pour le courant de l’onduleur et la tension du bus continu.

### I.2.14-JIN, TAOTAO, WEN, JUN, ET SMEDLEY, KEYUE 2005 [46]

Les auteurs ont exposé une multitude de topologies d’onduleurs de tension trois niveaux pouvant être appliquées comme filtres actifs. Ces topologies, initialement conçues afin de manipuler des courants bidirectionnels, étaient empruntées aux systèmes de commande des moteurs électriques, et de compensation de l’énergie réactive. Le résultat théorique, validé

expérimentalement, a révélé qu'avec une structure appropriée, la chute de tension dans chaque interrupteur semi-conducteur pouvait être clampée à la moitié de la tension du bus continu. Ainsi, la tension supportée par chaque composant est réduite, ce qui entraîne le gain du coût du système entier. Par conséquent, on obtient la topologie la plus adaptée aux applications haute tension et forte puissance.

### **I.2.15-BENMEDDOUR, M. ET BOUMAHRAZ, M 2007 [47]**

L'objectif principal de ce travail est de développer une technique de commande qui permet au courant absorbé de demeurer non seulement sinusoïdal mais aussi en phase avec la tension, ce qui est le souci actuel de la plus parts des chercheurs et industriels dans le domaine. Cette étude introduit une stratégie de commande appliquée à une topologie, non polluante, où on combine en cascade les deux convertisseurs Dévolteur et Survolteur dans un seul étage de puissance «Cascade Dévolteur - Survolteur CDS» (Figure 1.3) et produit une solution, simple à implémenter, de contrôle du facteur de puissance pour un convertisseur ca/cc monophasé. Cette topologie est susceptible d'améliorer fortement la forme du courant d'entrée.

L'étude du principe de fonctionnement est suivit d'une analyse détaillée montrant les caractéristiques statiques et dynamiques du convertisseur. Une analyse des modes de fonctionnement du convertisseur et de la stratégie de contrôle proposée «à hystérésis variable» pour obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité (Facteur de Puissance Unitaire FPU) sont accomplies.

La figure 1.3 désigne la topologie proposée.

Cette structure fonctionne dans les deux modes, survolteur et dévolteur, avec un facteur de puissance très proche de l'unité et indépendamment de la tension de sortie. Dans cette solution, le mode dévolteur offre les mêmes performances que pour le mode survolteur. Dans cette étude, les performances du circuit avec une charge résistive R, en parallèle avec le condensateur de filtrage C, sont examinées pour deux applications monophasées de 240W en sortie.

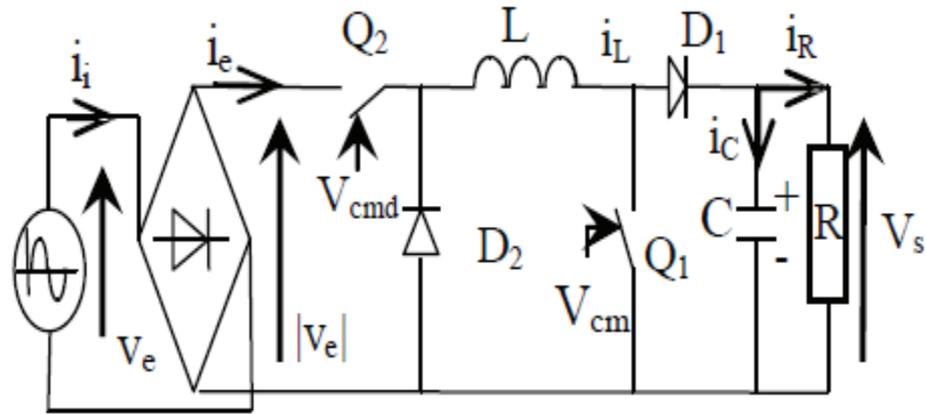


Fig.1.3- Schéma de la CSD à FPU [47]

**I.2.16- RACHMILDHA, TRI D 2008 [48]**

L'auteur traite le développement d'une commande directe de puissance utilisant l'approche prédictive hybride. La commande hybride considère chaque vecteur de tension du convertisseur comme une entité discrète qui sera appliquée pour commander un système linéaire continu. Un critère pour calculer le vecteur optimal de tension à appliquer sera établi à partir d'un modèle prédictif. Le vecteur optimal de tension à appliquer pour chaque période de commutation, et le correspondant temps d'application seront utilisés pour approcher la valeur réelle des variables d'état du système au point de référence désiré. Deux théories de puissance instantanées seront employées, p-q et p-q-r, pour une application de filtre active parallèle de puissance dans un système triphasé de 4 fils. Ces théories instantanées de puissance ont été développées pour être appliquées aux systèmes non équilibrés utilisant les variables de puissance pour obtenir les courants qui devraient être injectés par le filtre actif. Le filtre actif produira la puissance réactive demandée par la charge et compensera la composante d'ondulation de la puissance active de sorte que la source livre seulement la puissance active constante.

**I.2.17- OUNEJJAR, YOUSSEF ET AL-HADDAD, KAMAL 2009 [49]**

Vu la topologie en redresseur monophasé, il n'est pas possible de faire un redresseur triphasé à bus DC commun. Pour cette raison les concepteurs du convertisseur PUC l'ont combiné avec la topologie NPC afin d'avoir un redresseur sept niveaux à bus DC à point milieu.

## **Chapitre I ===== ETAT DE L'ART DES FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE**

Ce redresseur nécessite la régulation des tensions de 8 condensateurs ce qui représente un défi important. La commande consiste à réguler les valeurs des tensions aux bornes des condensateurs, puis de réguler les courants  $i_d$  et  $i_q$ , la référence du courant  $i_q$  est égale à 0 pour maintenir un facteur de puissance unitaire.

### **I.2.18- HOOSHMAND, RAHMAT ALLAH 2011 [50]**

L'auteur a présenté un nouveau système de contrôle de filtre actif et cela par l'utilisation d'un régulateur PI pour fournir des conditions qui suivent le courant de référence dans un cycle complet, afin de générer des impulsions d'amorçage par le procédé d'hystérésis.

### **I.2.19- RAHMOUNI, A 2012 [51]**

L'auteur présente une comparaison des performances, sous les mêmes conditions de fonctionnement, de deux nouvelles méthodes de commande. Elles sont proposées pour l'identification des courants de référence perturbateurs d'une charge non linéaire d'un filtre actif parallèle FAP. La première se base sur le calcul des composantes fondamentales du courant de charge CF, la deuxième et la méthode des puissances continues PC. Le but de ce travail est de mettre en évidence la fiabilité et l'efficacité de ces deux méthodes proposées.

### **I.2.20- MESBAHI, NADHIR ET OUARI, AHMED 2014 [52]**

Les auteurs proposent une nouvelle technique de commande du SAPF basée sur l'utilisation d'un filtre multi-variable : Commande Directe de Puissance (DPC). Elle est basée sur l'utilisation directe des puissances instantanées comme variables de contrôle. Cette technique n'a pas besoin de l'utilisation des blocs de modulation, car les états de commutation de l'onduleur sont choisis directement par une table de commutation.

## **I.3- CONCLUSION**

Dans ce 1<sup>er</sup> chapitre un état de l'art des filtres actifs, du point de vue circuit de puissance, a été présenté. On a vu une multitude de configurations, ces derniers sont dédiées à des applications bien déterminées, notamment la compensation des harmoniques, des déséquilibres et des creux de tension engendrés par les cyclo-convertisseurs.

## **Chapitre I ===== ETAT DE L'ART DES FILTRES ACTIFS DE PUISSANCE**

Les travaux de recherches ont été orientés vers des nouvelles solutions à savoir les filtres actifs : série, parallèle et hybride, dans ce contexte un état de l'art actuel des filtres actifs a été dressé dans ce chapitre pour qui il nous aide à déterminer la stratégie et les points de contributions de notre travail.

Dans le chapitre suivant, on présentera une étude de la pollution harmonique.

# Chapitre II

## ÉTUDE DE LA POLLUTION HARMONIQUE

### II.1- INTRODUCTION

Les convertisseurs électroniques et l'électronique de puissance ont donné naissance à de nombreuses applications nouvelles, offrant aux clients un confort, une flexibilité et une efficacité inégalables. Mais, leur prolifération au cours des 2 dernières décennies est devenue inquiétante et préoccupante et se trouve à l'origine de problèmes dont le nombre ne cesse de croître. Ces charges électroniques polluent, non seulement, le réseau de distribution de courant alternatif mais sont, apparemment, aussi très sensibles à la distorsion de la tension.

La situation au niveau des réseaux alternatifs BT est devenue, depuis plus d'une décennie, de plus en plus très préoccupante. La qualité du courant électrique dans les installations électriques commerciales se dégrade incontestablement. Outre, les perturbations extérieures telles que les coupures, les creux et les pointes provoquées par la commutation et par les phénomènes atmosphériques, il existe aussi des causes intrinsèques et internes spécifiques à chaque site, dues à une utilisation conjuguée de charges linéaires et non linéaires. Un déclenchement intempestif des dispositifs de protection, des surcharges harmoniques, des niveaux élevés de distorsions des tensions et des courants, l'augmentation de la température dans les conducteurs et dans les générateurs sont, autant, des facteurs contribuant à détériorer la qualité et la fiabilité d'un réseau alternatif.

Cependant, les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années, dans le domaine des dispositifs électroniques de puissance (IGBT, GTO ...), ont permis de concevoir des dispositifs d'élimination des harmoniques auto-adaptables appelés **compensateurs actifs d'harmoniques**, ou encore, **filtres actifs**. Les compensateurs actifs d'harmoniques s'avèrent être une option valable pour la régulation des niveaux des distorsions harmoniques dans de nombreuses applications [8,9].

### II.2 - OBJECTIFS

Les objectifs de ce chapitre sont :

- Étudier les caractéristiques générales des perturbations électriques.
- Détailler les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées imposées par les normes internationales.

### II.3 - DIFFERENTS TYPES DE PERTURBATIONS ELECTRIQUES

Les perturbations électriques ne sont considérées qu'à travers la gêne et le dysfonctionnement qu'elles peuvent causer à un système sensible. La notion des perturbations

est, par conséquent, relative. Cependant, elles peuvent être, schématiquement, classées selon 2 catégories :

- Celles qui portent atteintes à la continuité de l'alimentation et qui se traduisent par des coupures.

Le problème à résoudre vis-à-vis de ces perturbations est celui de la fiabilité du réseau d'alimentation.

- Celles liées à la qualité de l'alimentation proprement dite. Ce sont les fluctuations de l'onde de tension caractérisée par la fréquence, l'amplitude, la pureté de la forme sinusoïdale de l'onde et la symétrie du système triphasé.

Parmi ces perturbations, on distingue plusieurs types dont certaines sont, brièvement, définies ou décrites dans ce qui suit.

### II.3.1- Creux de tension & coupures brèves

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min [IEEE Std. 1159]. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min. Ils sont compris entre le 2<sup>ème</sup> et le 3<sup>ème</sup> coup de tension : le premier étant son effondrement, le second sa remontée. L'effondrement de la tension est proportionnel à l'élévation du courant. Inversement, la remontée de la tension est proportionnelle à l'effondrement du courant. Cependant, l'importance de ces à-coups est d'autant plus faible que l'on s'éloigne de l'endroit où s'est produite la perturbation (Fig. 2.1).

Les coupures brèves sont définies comme étant des disparitions de la tension d'alimentation pendant un temps qui n'excède pas une minute. Par convention de langage, une coupure brève est un creux de tension de 100% de l'amplitude de la tension (Fig. 2.2).

Les creux de tensions et coupures brèves sont, principalement, produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont, également, la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau (démarrage des moteurs, branchement de charges importantes, ...etc).

### II.3.2 - Fluctuations de tension & flicker

Une fluctuation de tension est décrite comme une variation de l'enveloppe de la tension. L'amplitude de celle-ci doit se situer dans une bande de 10% de sa valeur nominale. Ce type de fluctuation est à distinguer des variations lentes de tension dues à la variation progressive de la consommation dans les réseaux. Les principales sources de fluctuations rapides sont les

charges industrielles dont le fonctionnement aléatoire ou intempestif occasionne de brusques variations de puissances telles que les machines à souder et les fours à arc. Ces derniers produisent des variations erratiques permanentes de tension. Ces fluctuations sont responsables du phénomène de "flicker" (Fig. 2.3) [10].

Le flicker est le phénomène de papillotement des sources lumineuses, dû aux fluctuations de tension de l'alimentation électrique (Fig. 2.3). Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en amenant une fatigue visuelle et nerveuse. Il peut concerner, simultanément, un grand nombre de personnes (perturbation du réseau de distribution publique HTA et HTB). Aujourd'hui, les limites des fluctuations de tension périodiques qui provoquent l'effet du flicker sont connues. Les générateurs du flicker sont nombreux et peuvent être très puissants (fours à arc en aciérie). Il est très important de les connaître, sachant que des variations de tension de moins de 1 % peuvent apporter une gêne. Leur identification est une nécessité car le flicker est souvent difficile à supprimer sur un réseau existant. Il est donc important d'analyser les risques potentiels du flicker dès la pré étude d'une installation et de prévoir, dès la conception du réseau, les solutions permettant de s'en affranchir. Ces solutions peuvent être :

- Modification du type d'éclairage.
- Modification de la structure du réseau.
- Adaptation du fonctionnement du perturbateur.
- Installation d'un équipement de réduction du flicker [11].

### II.3.3- Déséquilibre de tension

Le phénomène de déséquilibre est défini comme étant une différence d'au moins une des 3 tensions du réseau électrique soit en amplitude soit en déphasage. Il résulte, essentiellement, de la présence de fortes charges monophasées raccordées non uniformément sur le réseau triphasé (Fig.2.5).

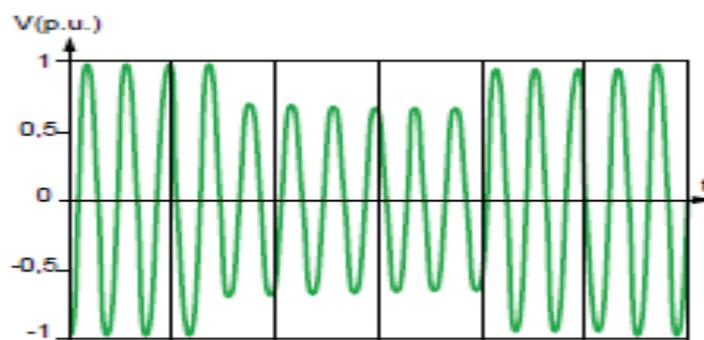


Fig. 2.1 - Creux de tension [12].

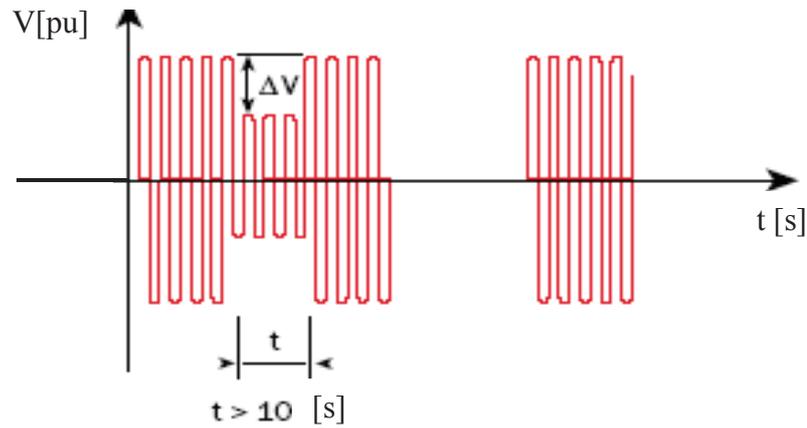


Fig. 2.2 - Coupures brèves [13].

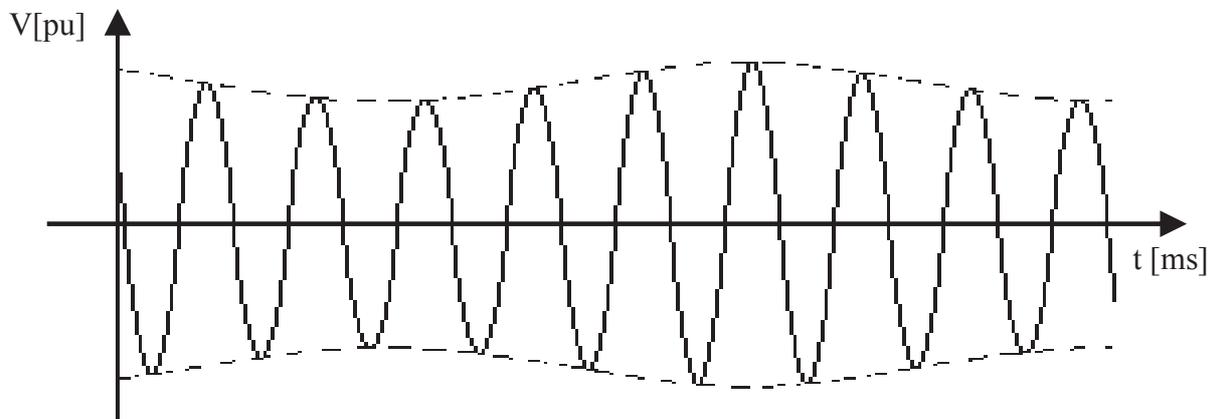


Fig. 2.3 - Phénomène du flicker [11].

### I.3.4- Surtensions transitoires

Les phénomènes de surtensions transitoires (Fig. 2.5) sont, également, des phénomènes brefs dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale pendant une durée inférieure à une seconde. Leurs origines sont, essentiellement, liées :

- A la foudre.
- Aux différentes manœuvres opérées sur le réseau (coupure de courant de court-circuit, enclenchement de ligne à vide ...).
- Aux fonctionnements anormaux du réseau (variation brusque de la charge, résonances...).

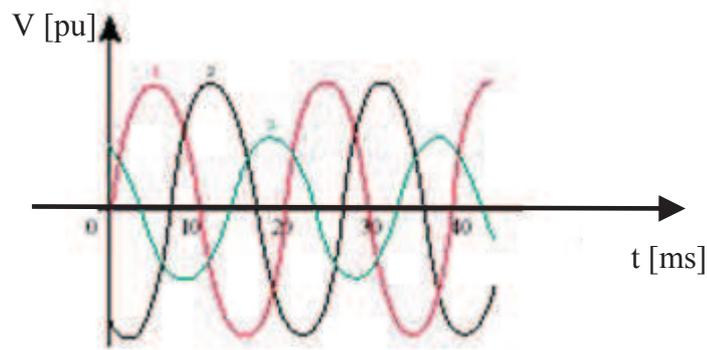


Fig. 2.4 - Déséquilibre de tension [13].

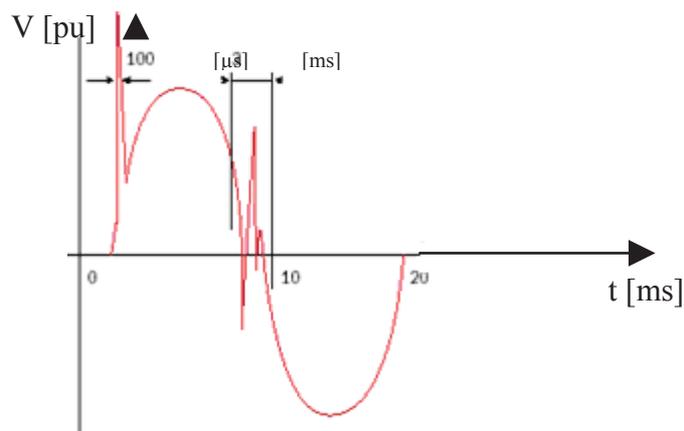


Fig. 2.5 - Surtensions transitoires [13].

### II.3.5- Harmoniques & inter-harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence du réseau. En général, nous différencions 2 types d'harmoniques :

- Les harmoniques de courant dus à la présence de charges non linéaires telles que les appareils d'éclairage fluorescents, les fours à arc, les redresseurs, les variateurs électroniques de vitesse, qui peuvent être identifiés à une source de courant harmonique.

- Les harmoniques de tension issus du réseau lui-même dus, en général, à des petites imperfections de construction des bobinages des différents matériels du réseau eux-mêmes, tels que les machines tournantes et les transformateurs qui, pratiquement, ne délivrent pas une tension purement sinusoïdale. Ces harmoniques peuvent être identifiés à une source de tension harmonique (Fig. 2.6).

La tension du réseau peut contenir des composantes fréquentielles qui ne sont pas des multiples entiers du fondamental. Ce type de composantes sont, communément, appelées inter-harmoniques. Elles peuvent apparaître soit sous forme de fréquence discrète, soit sous forme de spectres à large bande. Leurs sources principales sont les cyclo-convertisseurs, les

convertisseurs de fréquence, les machines synchrones, les machines à souder et les fours à arc [10].

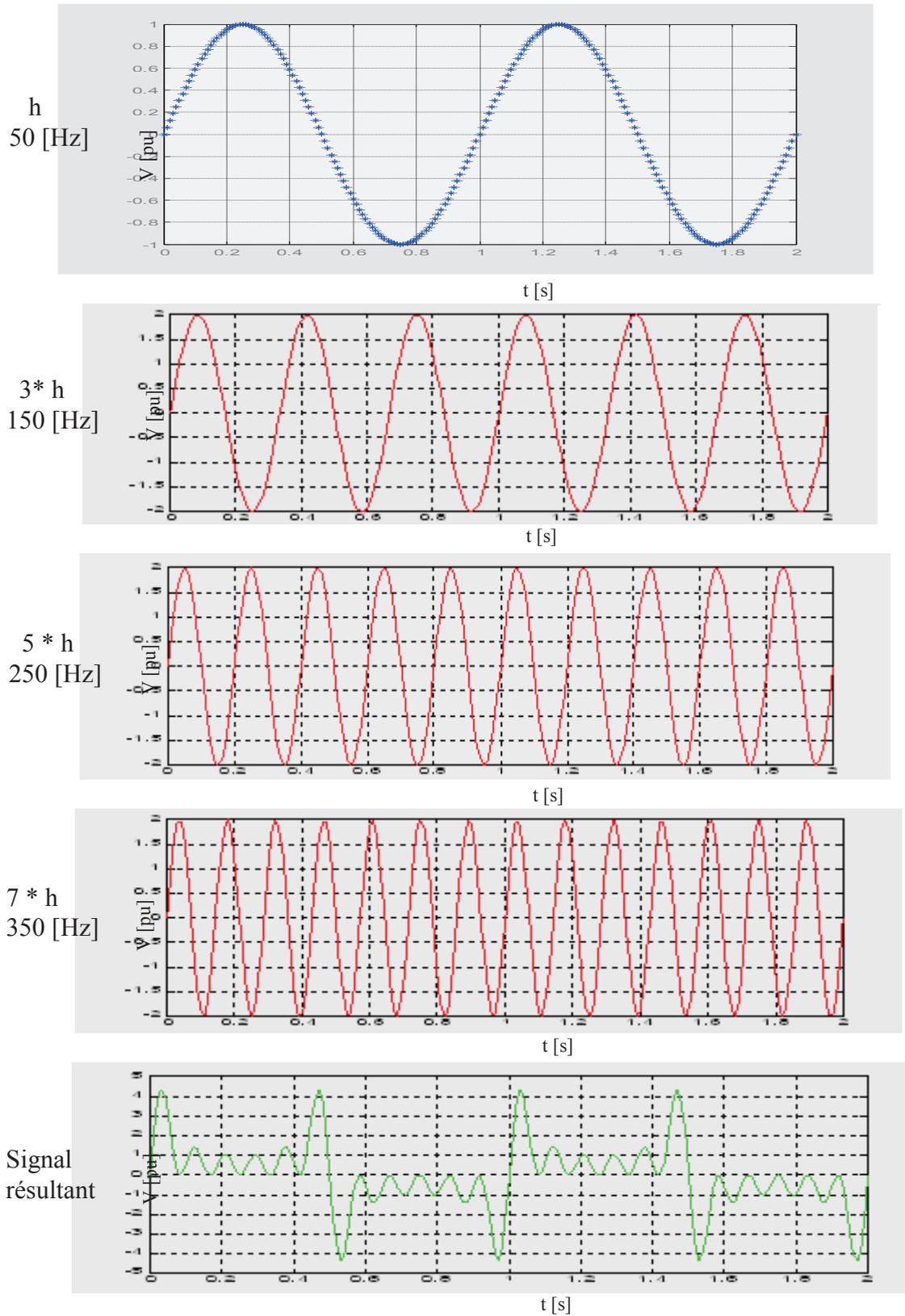


Fig. 2.6 - Harmoniques de tension.

**II.4 - PERTURBATIONS HARMONIQUES****II.4.1 - Nature physique du phénomène**

La plupart des appareils électriques raccordés à un réseau alternatif nécessitent, pour leur bon fonctionnement, une alimentation sinusoïdale 50 [Hz] dans la majorité des pays au monde et 60 [Hz] dans quelques pays tels que les USA, le Japon,.... En Algérie, par exemple, les installations industrielles consommatrices absorbent, théoriquement, un courant sinusoïdal à 50 [Hz]. Les charges dites passives, comme les résistances de chauffage ou les condensateurs absorbent, elles-aussi, un courant sinusoïdal à 50 [Hz]. Par contre, certains appareils absorbent un courant périodique, mais non sinusoïdal [14]. Le signal, ainsi obtenu, sera déformé et sera caractérisé par la superposition d'un certain nombre, juxtaposé, d'onde sinusoïdale de fréquence  $f_h$  dite fréquence multiple de la fréquence de l'harmonique fondamentale  $f$  reliées, entre-elles, par :

$$f_h = h f = 50 h \quad (2.1)$$

Avec  $h$  et le rang harmonique d'ordre 1,2,3...

Ils produisent sur le réseau qui les alimente une déformation de la tension, qui n'est alors plus sinusoïdale. On dit qu'ils sont non linéaires et qu'ils émettent des courants harmoniques vers le réseau. La présence d'appareils non linéaires sur un réseau électrique peut entraîner des dysfonctionnements des autres appareils raccordés à proximité.

Ces signaux de tension et/ou de courant, ainsi déformés, peuvent être traités et analysés par la fameuse technique des séries de Fourier ou par l'analyse spectrale de Fourier. Elle consiste à décomposer un signal périodique de forme quelconque en une somme de signaux sinusoïdaux dont chacun est dit harmonique de fréquence  $f_h$ , définie par l'équation (2.1). Le problème des harmoniques se traite en examinant le réseau électrique soumis de façon indépendante, à chacune de ces fréquences harmoniques. On octroie à cette technique le principe de superposition, malgré la non linéarité des sources provoquant les déformations dites harmoniques

**II.4.2 - Identification des harmoniques**

Les problèmes d'harmoniques peuvent se traduire de différentes façons. Certains sont spectaculaires. La manifestation, la plus fréquente, est la destruction des condensateurs de compensation de l'énergie réactive. Cet effet est, généralement, facile à détecter car, d'une part, il se produit très rapidement après la mise en service des condensateurs. De plus, il est

toujours associé à une modification récente de l'installation. Ceci se produit, le plus souvent, en cas de modification de la puissance des batteries de compensation d'énergie réactive. Cependant, il peut, également, apparaître à la mise hors service ou parfois en service d'un transformateur en parallèle avec un groupe d'autres transformateurs. L'installation de nouveaux convertisseurs (comme les variateurs de vitesse) ou la modification de technologie des convertisseurs déjà en place est aussi une cause d'apparition du phénomène. Etant le siège de courants harmoniques très important, dus à un phénomène de résonance, les installations, dans ce cas, ont une réaction plus ou moins rapide selon l'acuité du phénomène. Quelle que soit la cause, une mesure des courants harmoniques permet, aisément, de confirmer le diagnostic. Ce ne sont pas toujours les condensateurs qui sont les premiers endommagés. Les disjoncteurs et matériels de ligne sont, également, soumis aux courants harmoniques. Il n'est pas exceptionnel, dans ce cas, de constater la destruction d'un disjoncteur ou d'un contacteur. De même, un câble peut chauffer au point de détruire son isolant ou encore de prendre feu. Ce type de phénomène, à court terme, est aisément décelable, car il est toujours lié à la présence de très forts courants harmoniques. Mais, si certains effets sont assez caractéristiques, d'autres ont des conséquences qui sont, à moyen ou à long terme, plus insidieuses. Ces derniers sont difficiles à identifier de façon formelle et ce pour 3 principales raisons :

- La simultanéité de plusieurs perturbations sur le réseau est fréquente. La présence d'harmonique est souvent associée à la présence de surtensions transitoires dues, par exemple, aux commutations des thyristors d'un convertisseur.

- Les effets différés ne surviennent pas forcément au moment de la contrainte maximale.

La corrélation avec le phénomène responsable est donc difficile, voire, parfois impossible.

- La sensibilité réelle des appareils, qui d'ailleurs est aujourd'hui assez mal connue, varie selon les modèles.

Dans ces conditions, l'identification de la cause du phénomène ne peut se faire que par la mesure des tensions harmoniques présentes sur le réseau. On peut les mesurer à l'aide d'un voltmètre sélectif ou encore à l'aide d'un analyseur harmonique de tensions.

Une première méthode consiste à mesurer le taux de distorsion harmonique. Ce critère est donné par la plupart des analyseurs harmoniques actuels et même certains multimètres. Il représente une bonne approximation de la contrainte globale subie par les appareils raccordés au réseau. La mesure consiste, ensuite, à rapprocher les valeurs contenues dans le tableau 2.1. Ce tableau est issu de l'expérience des experts appelés à traiter les problèmes d'harmoniques chez les utilisateurs. Il constitue une référence qu'il faut interpréter avec un certain recul, en

fonction de la situation réelle. Dans l’avenir, ces valeurs sont susceptibles d’évoluer selon les technologies et la sensibilité des matériels. Une autre méthode de mesure consiste à déterminer la valeur efficace « vraie » du courant (TRMS) circulant dans les conducteurs alimentant les batteries de compensation d’énergie réactive, à l’aide d’un multimètre et d’une pince ampèremétrique. On compare ensuite la valeur lue à la puissance réactive des condensateurs en service donnée par :

$$I_1 = \frac{10^3 Q[kVar]}{\sqrt{3} U_1 [V]} \tag{2.2}$$

Lorsque la valeur du courant mesurée dépasse 1.3 fois la valeur théorique du courant à 50 [Hz], il faut suspecter un problème d’harmoniques sur le réseau [14].

TAB. 2.1 - Conséquences d’une exposition à long terme aux harmoniques [14].

<b>Taux de distorsion harmonique en tension</b>	<b>Conséquences d’une exposition à long terme</b>
TDH < 5%	Problèmes inexistant dans la plupart des cas.
5% < TDH < 7%	Des problèmes peuvent survenir sur des matériels, anormalement, sensibles.
7% < TDH < 10%	Des problèmes commencent à apparaître sur des appareils de conception plus robuste.
TDH > 10%	Les effets à long terme sont, pratiquement, certains.

**II.4.3 - Définitions & aspects théoriques des phénomènes**

**II.4.3.1 - Harmoniques d’un signal périodique**

La forme des ondes de courant et de tension relevée sur les réseaux industriel et tertiaire s’éloigne assez de la circulation sur le réseau de courants non sinusoïdaux. La question pratique est de savoir quel impact a, l’ensemble de tous les courants non sinusoïdaux, sur la tension. On sait répondre en partie à cette question : comme tous les éléments du réseau ont un comportement linéaire, l’effet sur la tension de l’ensemble des courants est la superposition de l’effet qu’aurait chaque courant individuellement. Reste un problème de taille : quel effet, un courant donné, a-t-il sur la tension ? On sait répondre quand le courant est sinusoïdal, avec les techniques qui utilisent les notions d’impédance complexe ou de diagramme de Fresnel. Mais, cela paraît bien plus compliqué car les formes de courant peuvent être très différentes de la sinusoïde pure. Pourtant, la solution consiste à utiliser la décomposition en série de Fourier qui s’appuie sur le fait que tout signal périodique peut être représenté par une somme d’ondes sinusoïdales : une onde à la fréquence fondamentale de 50

[Hz] et des ondes de fréquence multiple de la fréquence fondamentale (les harmoniques). Alors, quel que soit le courant injecté, grâce à la linéarité du comportement du réseau, on est amené à examiner l'effet d'un courant sinusoïdal injecté dans un réseau (courant et tension dans chaque élément). L'effet global s'obtiendra en superposant chaque effet élémentaire. Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode. Ceux qui l'utilisent ont été amenés à parler des harmoniques comme d'un phénomène physique à part entière. Dans la réalité, on observe seulement des signaux non sinusoïdaux.

Si l'on n'avait pas connu cette méthode, on aurait eu à résoudre, dans le domaine temporel, des équations du type :

$$v(t) = R(t) + L \frac{di(t)}{dt} \tag{2.3}$$

Ce qui est faisable, mais plus laborieux. Grâce à la décomposition en série de Fourier, ou décomposition harmonique, on traite des équations algébriques du type :

$$V = RI + jL\omega I = ZI \quad \text{Avec} \quad Z = R + j\omega L \tag{2.4}$$

Où le paramètre temps n'apparaît pas de façon explicite. Il s'y substitue par le terme :

$$\omega = 2\pi f \tag{2.5}$$

D'où la dénomination de domaine fréquentiel. L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs dans l'analyse et la synthèse des réseaux. Ainsi, on peut dissocier l'étude fondamentale de celle relative aux fréquences harmoniques. On traite le problème global en autant de problèmes linéaires qu'il y en a de rangs harmoniques.

$$U_1 = Z_1 I_1 \tag{2.6}$$

$$U_h = Z_h I_h \tag{2.7}$$

Il faut noter que  $U_h$ ,  $Z_h$  et  $I_h$  ont des grandeurs vectorielles qu'on peut décrire par leur amplitude et leur phase. Grâce à cette décomposition, l'analyse des impédances rencontrées par les courants harmoniques peut être représentée sous la forme amplitude ou phase en fonction de la fréquence. La connaissance des vecteurs de courant et des impédances du réseau permet de déterminer les vecteurs de tension harmonique en chaque point du réseau [14].

**II.4.3.2 - Décomposition en série de Fourier**

Le signal  $s(t)$  peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période T, de fréquence  $f = 1/T$  et de pulsation  $\omega$ . Ce signal  $s(t)$  peut se décomposer de la façon suivante :

$$s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cos(\omega h t) + b_h \sin(\omega h t)] \tag{2.8}$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T s(t) dt \quad \text{Avec} \quad h = 0 \quad (2.9)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \cos(wh t) dt \quad \text{Avec} \quad h \geq 1 \quad (2.10)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_0^T s(t) \sin(wh t) dt \quad \text{Avec} \quad h \geq 1 \quad (2.11)$$

Sous forme compacte, l'équation (1.8) peut s'écrire :

$$s(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} C_h \sin(wh t + \theta_h) \quad (2.12)$$

Avec  $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$  &  $\theta_h = \arctan \frac{a_h}{b_h}$

Le terme  $[a_h \cos(wh t) + b_h \sin(wh t)]$  ou  $C_h \sin(wh t + \theta_h)$  est l'harmonique de rang h. La

grandeur  $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$  est l'amplitude de l'harmonique. Il faut noter qu'on utilise très

souvent le terme amplitude pour désigner la valeur efficace harmonique donnée par :

$$C_{eff h} = \frac{C_h}{\sqrt{2}} \quad (2.13)$$

$C_1$  est l'amplitude fondamentale. La grandeur  $\theta_h$  est la phase de l'harmonique de rang h et  $a_0$  est la composante continue du signal. Jusqu'à présent, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 [Hz]. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend, généralement, de 100 à 2500 [Hz] correspondant aux rangs h compris entre 2 et 50 ( $2 \leq h \leq 50$ ).

### II.4.3.3 - Analyse d'un signal

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal est l'évaluation de sa valeur efficace. La valeur efficace d'un signal  $s(t)$  périodique de période T est donnée par :

$$S_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T s^2(t) dt} \quad (2.14)$$

La valeur efficace d'un signal déformé tient compte de la présence de toutes les composantes harmoniques, interharmoniques et de la composante continue. Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est, donc, différente de la valeur

efficace du signal fondamental. Il est, alors, possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale avec celle du signal [14].

#### **II.4.3.4 - Pourcentage d'harmoniques**

C'est le pourcentage entre la valeur efficace harmonique et celle du fondamental.

$$\tau_h [\%] = 100 \cdot \frac{S_{eff\ h}}{S_{eff}} \quad (2.15)$$

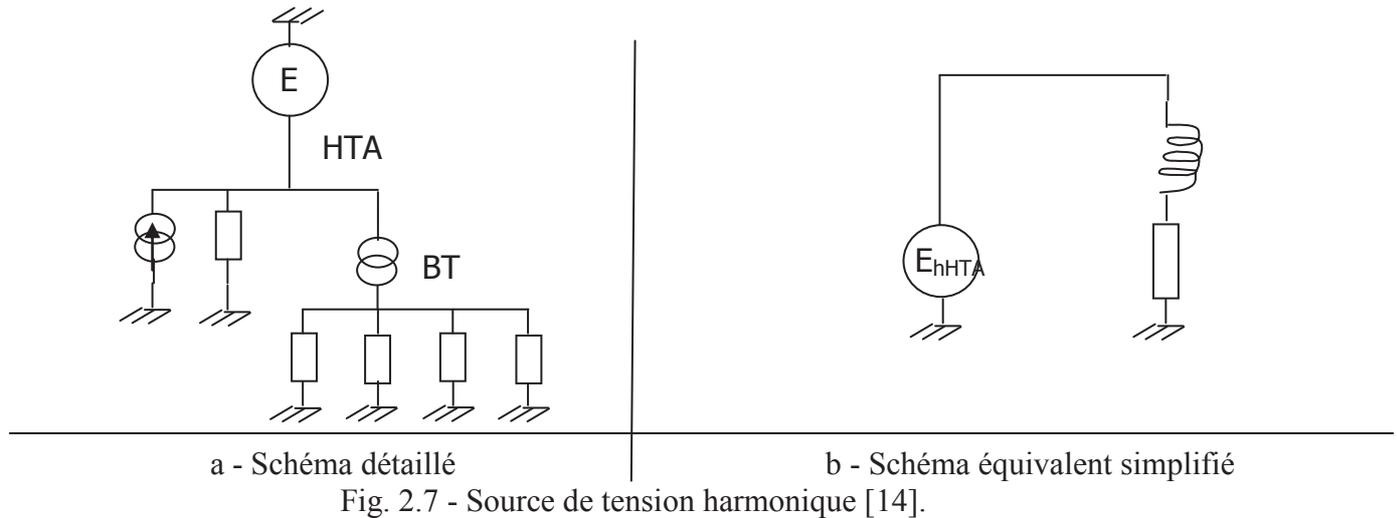
### **II.4.4 - Harmoniques de courant & de tension**

#### **II.4.4.1 - Courant harmonique**

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents dans les réseaux électriques proviennent de la prolifération de charges non linéaires. On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 [Hz], elle n'absorbe pas un courant purement sinusoïdal à 50 [Hz]. Ces charges se comportent, approximativement, comme des sources de courants harmoniques, c'est-à-dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau. Une charge passive est une charge ne comportant pas de systèmes de commutation rapide, autorisant un découpage de l'onde fondamentale de 50 [Hz], contrairement aux charges actives. Les charges actives utilisent toujours des commutateurs électroniques de puissance.

#### **II.4.4.2 - Tension harmonique**

On peut parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. En effet, le raccordement d'un récepteur de faible puissance ne modifie presque pas le niveau préexistant (Fig. 2.7).



### II.4.4.3 - Loi d'Ohm généralisée & impédance harmonique

L'impédance présentée dépend de la fréquence du réseau considéré. On peut définir en tout point d'un réseau une impédance harmonique  $Z_h$ , qui dépend du rang harmonique  $h$  considéré. Elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. Les courants harmoniques émis par une charge perturbatrice se partagent entre les différentes lignes. Le produit des harmoniques de courant provenant des charges non linéaires par l'impédance harmonique du réseau, en un point donné du réseau, crée des harmoniques de tension déterminés par la loi d'Ohm généralisée (Fig. 2.9) :

$$V_h = Z_h I_h \tag{2.16}$$

### II.4.5 - Distorsion harmonique

Plusieurs expressions peuvent être utilisées pour quantifier la déformation d'un signal.

#### II.4.5.1 - Taux harmonique de rang $h$ : THH

On caractérise la déformation par le taux harmonique  $S_h(\%)$  de rang  $h$ , défini par :

$$THH = S_h(\%) = \frac{C_h}{C_1} 100 = 100 \frac{S_{eff,h}}{S_{eff}} = \tau_h [\%] \tag{2.17}$$

$C_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$  et  $C_1$  représente la composante fondamentale.

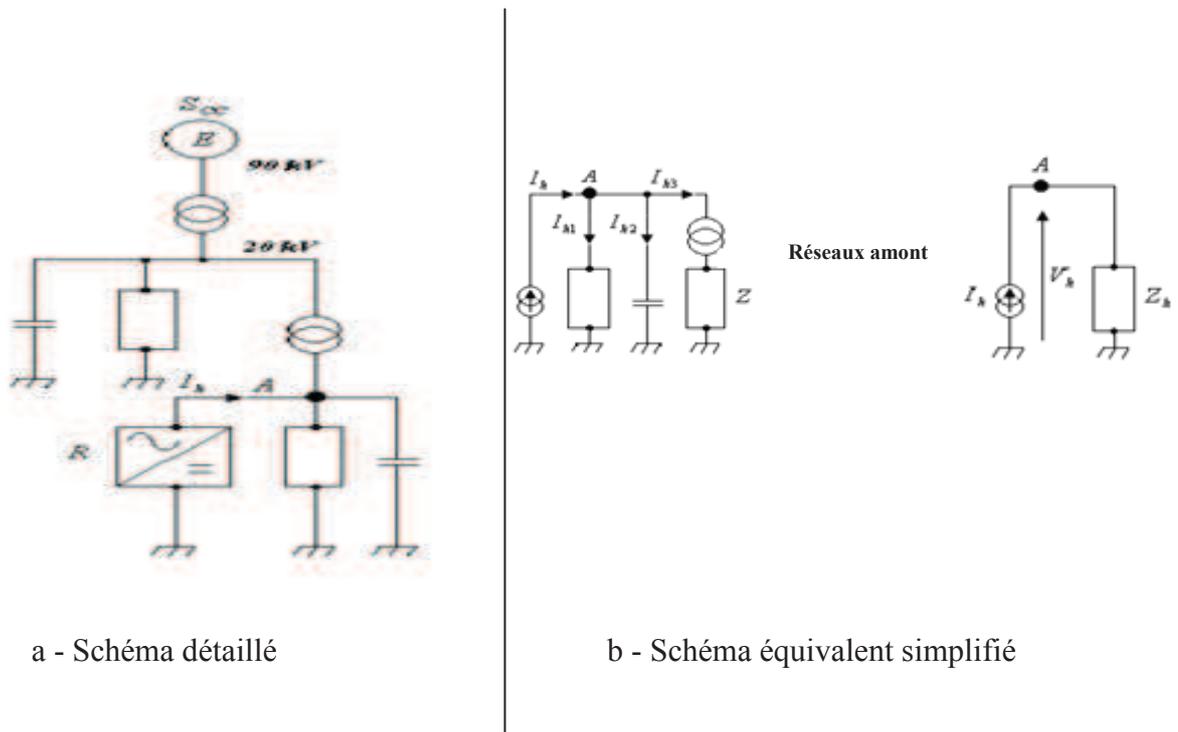


Fig. 2.8 - Impédance harmonique [14].

### II.4.5.2 - Taux global de distorsion harmonique : THD

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques. Il est donné par le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2}}{C_1} \tag{2.18}$$

Selon la sensibilité des appareils, des rangs plus ou moins élevés, sont pris en compte. La tendance actuelle dans les normes est de considérer les harmoniques jusqu'au rang  $h = 50$ . Précisons que, dans les normes CEI, on trouve une autre définition du *THD*.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} C_h^2}}{S_{eff}} \tag{2.19}$$

Bien qu'elle donne une mesure analogique des signaux plus aisée, cette notion est de moins en moins utilisée. En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 [Hz]. Ceci correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation.

Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieure à 2500 [Hz]. C'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend, généralement, de 100 à 2500 [Hz], correspondant aux rangs  $2 \leq h \leq 50$ .

### II.4.5.3 - Taux de distorsions pondérées : TDP

Afin de tenir compte de la spécificité de certains types de matériels tels que les condensateurs, les inductances ou les moteurs, on peut utiliser les *TDP* en tension. Ils sont définis en fonction de la tension réduite  $u_h = \frac{U_h}{U_1}$  [pu].

- Pour les condensateurs :

$$TDP_{X_c} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} h^2 u_h^2} \quad (2.20)$$

- Pour les inductances :

$$TDP_{X_L} = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (2.21)$$

- Pour les moteurs :

$$TDP_M = \sqrt{\sum_{h=2}^{13} \frac{u_h^2}{h^2}} \quad (2.22)$$

### II.4.6 - Facteur de puissance

Pour un système monophasé comportant une source de tension, une ligne et une charge, les expressions instantanées du courant simple de charge  $i(t)$  et de sa tension simple  $v_s(t)$  peuvent s'écrire sous la forme :

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \alpha_h) \quad (2.23)$$

Avec  $\alpha_h$  : déphasage du courant harmonique de rang  $h$ .

$$v_s(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_{sh} \sin(h\omega t + \beta_h) \quad (2.24)$$

Avec  $\beta_h$  : déphasage de la tension harmonique de rang h.

Les valeurs efficaces de la tension et du courant sont :

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (2.25)$$

Avec  $V_h$  : Valeur efficace de la tension harmonique d'ordre h.

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.26)$$

Avec  $I_h$  : Valeur efficace du courant harmonique d'ordre h

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

$$S = 3V_{eff} I_{eff} = 3\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.27)$$

La puissance active est définie par :

$$P = 3\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad (2.28)$$

Avec  $\varphi_h = \beta_h - \alpha_h$

Le facteur de puissance  $F_P$  peut être exprimée par :

$$F_P = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\varphi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (2.29)$$

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale, le facteur de puissance devient :

$$F_P = \cos \varphi_1 \quad (2.30)$$

La puissance réactive d'un système triphasé équilibré, résultant du déphasage entre les grandeurs fondamentales du courant et de la tension est alors :

$$Q = 3V_1 I_1 \sin \varphi_1 \tag{2.31}$$

Pour tenir compte de la participation des harmoniques dans la puissance apparente, nous utilisons la notion de la puissance déformante D :

$$D = 3V_1 \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \tag{2.32}$$

La puissance apparente, pour un système triphasé équilibré pollué par les harmoniques, peut s'écrire :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{2.33}$$

Le facteur de puissance  $F_p$ , dans ce cas, sera donc :

$$F_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{2.34}$$

Le facteur de puissance est dégradé par la présence des harmoniques. La figure 2.10 montre le diagramme de Fresnel tridimensionnel, mettant en relief l'argument du facteur de puissance pour les systèmes triphasés équilibrés pollués.

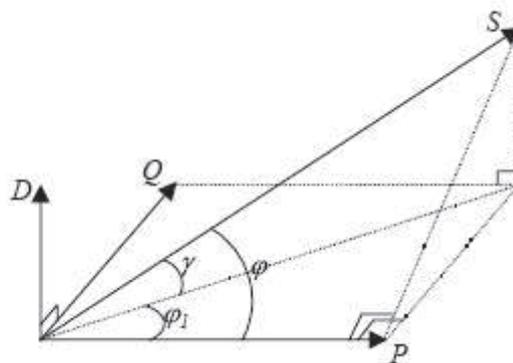


Fig. 2.9 - Diagramme des puissances [9]

## II.4.7 - Harmoniques dans un système triphasé

### II.4.7.1 - Système triphasé équilibré

Si on alimente un système de charge triphasé équilibré par un système de tensions triphasé équilibré, il s'écoule des courants équilibrés  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  (respectivement sur les phases  $a$ ,  $b$  &  $c$ ) tel que :

$$I_b(t) = I_a(t - \frac{T}{3}) \quad (2.35)$$

$$I_c(t) = I_a(t - \frac{2T}{3}) \quad (2.36)$$

Les expressions des signaux harmoniques de rang  $h$ , en négligeant leurs interactions mutuelles, sont :

$$s_{h,a}(t) = S_h \sin(hwt) \quad (2.37)$$

$$s_{h,b}(t) = S_h \sin(hwt - \frac{2\pi h}{3}) \quad (2.38)$$

$$s_{h,c}(t) = S_h \sin(hwt + \frac{2\pi h}{3}) \quad (2.39)$$

Si le réseau comporte un conducteur de neutre, les courants harmoniques d'ordre 3 ou multiples de 3 dus aux 3 phases s'y ajoutent car ils sont synchrones.

Supposons 3 courants  $i_a(t)$ ,  $i_b(t)$  &  $i_c(t)$  équilibrés et déphasés d'un tiers de période comme suit :

$$i_a(t) = I \cos(wt) \quad (2.40)$$

$$i_b(t) = I \cos(w(t + \frac{T}{3})) \quad (2.41)$$

$$\text{Avec } T = \frac{2\pi}{w}$$

$$i_c(t) = I \cos(w(t + \frac{2T}{3})) \quad (2.42)$$

Les harmoniques d'ordre 3 de ces courants sont obtenus en remplaçant  $w$  par  $3w$  comme suit :

$$i_{a3}(t) = I_3 \cos(3wt) \quad (2.43)$$

$$i_{b3}(t) = I_3 \cos(3wt + wT) = I_3 \cos(3wt + 2\pi) = I_3 \cos(3wt) \quad (2.44)$$

$$i_{c3}(t) = I_3 \cos(3\omega t + 2\omega T) = I_3 \cos(3\omega t + 4\pi) = I_3 \cos(3\omega t) \tag{2.45}$$

On a, alors :

$$i_{a3}(t) + i_{b3}(t) + i_{c3}(t) = 3I_3 \cos(3\omega t) \tag{2.46}$$

La figure 2.11 montre la circulation des courants harmoniques 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre.

### II.4.7.2 - Système triphasé déséquilibré

Pour l'étude des systèmes déséquilibrés, il est nécessaire de décomposer les signaux étudiés en système direct, inverse et homopolaire. Pour effectuer cette décomposition, on généralise et adapte la méthode de Fortescue, développée en 1918, pour la composante fondamentale de 50 [Hz] et pour les fréquences harmoniques [14].

TAB. 2.2 - Harmoniques dans un système triphasé équilibré [14].

Rang harmonique h	Signal	Types d'harmoniques
$h = 3k+1$ k : nombre entier	$s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{2\pi h}{3})$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{4\pi h}{3})$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé direct.
$h = 3k-1$	$s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{4\pi h}{3})$ $s_h \sin(h\omega t - \frac{2\pi h}{3})$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé inverse.
$h = 3k$	$s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t)$ $s_h \sin(h\omega t)$	Les harmoniques forment dans ce cas un système triphasé homopolaire.

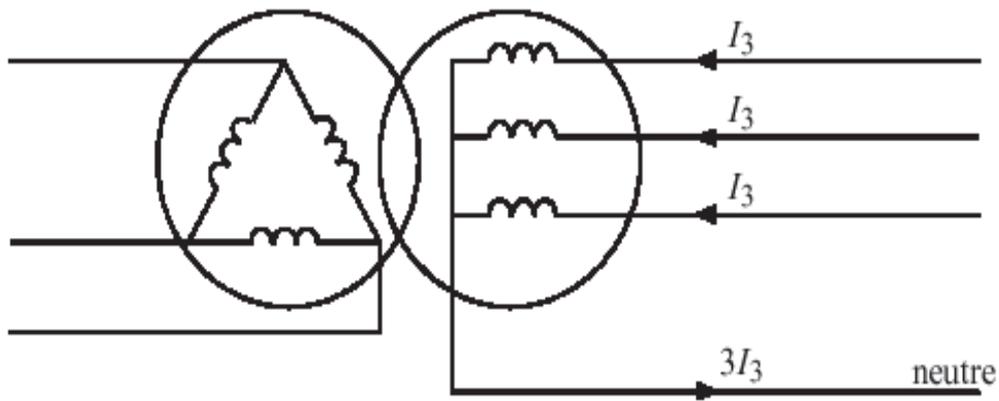


Fig. 2.10 - Circulation des courants harmoniques d'ordre 3 et multiples de 3 dans le conducteur du neutre [9].

## II.4.8 - Interharmoniques

Les interharmoniques sont des signaux de fréquence non multiple à la fréquence fondamentale. Certains sont émis par les charges non linéaires. D'autres sont injectés, intentionnellement, par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels.

### II.4.8.1 - Charges non linéaires produisant les interharmoniques

La grande majorité des tensions et courants interharmoniques sur le réseau est générés par des convertisseurs de fréquence statiques. C'est le cas des variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones qui renvoient vers le réseau des fréquences non multiples de la fréquence de sortie.

Les fours à arc sont, également, de fortes sources de courants interharmoniques. De simples machines tournantes peuvent aussi générer des courants interharmoniques de basses fréquences en présence d'une charge fluctuante. Mais, par rapport aux perturbations générées par des convertisseurs, leur amplitude est peu importante. Les fours à arc utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu.

#### II.4.8.1.1 - Four à arc à courant alternatif

L'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences). Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... (Fig. 2.11) [13].

**II.4.8.1.2 - Four à arc à courant continu**

L’arc est alors alimenté par l’intermédiaire d’un redresseur (Fig. 2.12). L’arc est plus stable qu’en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en :

- Un spectre semblable à celui d’un redresseur.
- Un spectre continu de niveau inférieur à celui d’un four à courant alternatif.

**II.4.8.2 - Signaux de télécommande de 175 [Hz] sur les réseaux de distribution**

Les compagnies de distribution d’électricité injectent des signaux de télécommande à des fréquences interharmoniques. Les émetteurs des signaux de télécommande sont placés au secondaire des transformateurs HTB/HTA, pour diffuser ce signal sur l’ensemble du réseau HTA et BT [15]. Il existe des émetteurs de tension branchés en parallèle. Les relais, placés chez les utilisateurs, sont sensibles au taux de ce signal à 175 [Hz] :

$$\tau_{175[Hz]} = \frac{V_{175[Hz]}}{V_{50[Hz]}} \tag{2.47}$$

Les relais sont conçus pour fonctionner si le taux du signal reçu est supérieur à 0.9 [%]. Ils ne fonctionnent pas si ce taux est inférieur à 0.6 [%]. La propagation des signaux de télécommande sur les réseaux peut être perturbée, par exemple, par la présence de selfs antiharmoniques.

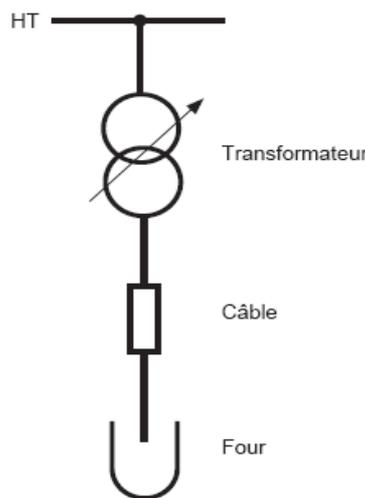


Fig. 2.11 - Four à arc alimenté en courant alternatif [13].

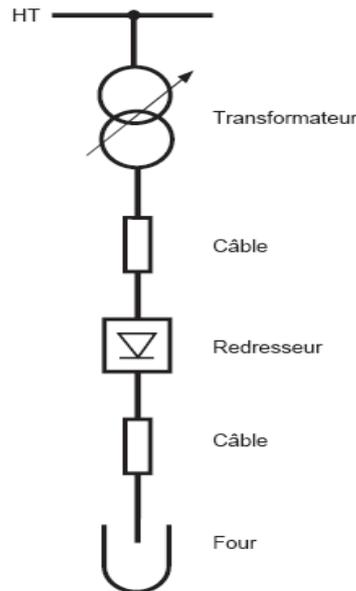


Fig. 2.12 - Four à arc alimenté en courant continu [13].

## II.5 - ORIGINE DES PERTURBATIONS HARMONIQUES

### II.5.1 - Appareils de production, de transport & de distribution

Cette catégorie concerne les appareils utilisés par les distributeurs d'énergie électrique. Parmi eux, on peut citer les alternateurs, les transformateurs et les convertisseurs de fréquence. La distorsion de la tension due aux matériels du réseau possède un taux, généralement, faible. Les imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs) des bobinages des machines tournantes, des alternateurs et des transformateurs, sont à l'origine de la pollution harmonique de la tension du réseau. Par conséquent, la machine synchrone produit les harmoniques au réseau en vue de la distribution de sa force électromotrice représentée par l'équation suivante :

$$F(x) = \frac{2\sqrt{2IN}}{\pi} \sin(\omega t) \sum_{h=1}^{\infty} \sin h \left( \frac{2\pi x}{\lambda} \right) \tag{2.48}$$

Où  $\lambda$  est la longueur d'onde,  $I$  représente le courant parcourant les enroulements de la machine et  $N$  représente le nombre de conducteurs par fente [16].

### II.5.2 - Secteur industriel

Les convertisseurs d'électronique de puissance (redresseurs, gradateurs), les fours à arc, les fours à induction et les variateurs de vitesse constituent les principales causes de la

distorsion harmonique dans le milieu industriel. Ils sont la cause majeure de la détérioration de la qualité du réseau. Les convertisseurs d'énergie fonctionnant en commutation absorbent des courants riches en harmoniques. La circulation de ces courants à travers l'impédance de court-circuit dégrade la forme d'onde du réseau au point de raccordement de l'installation. L'importance de cette pollution est d'autant plus grande que la puissance de conversion est grande et que la puissance de court-circuit est faible.

### **II.5.3 - Secteur tertiaire**

Avec le développement de l'informatique, de la climatisation et des éclairages à base de tubes fluorescents, la clientèle tertiaire contribue de façon significative à la pollution harmonique. Les activités les plus concernées dans ce secteur sont les administrations, les centres commerciaux, les hôpitaux et les bureaux. Le montage électronique, le plus répandu dans ce secteur, est le redresseur monophasé à filtre capacitif utilisé comme étage d'entrée des dispositifs électriques tels que les alimentations de téléviseurs, des ordinateurs, des lampes à ballast et des variateurs de vitesse des machines électriques. Malheureusement, ce montage présente la particularité d'injecter des courants dont le THD est très élevé ( $100 [\%] < \text{THD} < 180 [\%]$ ). Ce taux varie selon l'application et dépend du dimensionnement de la charge du côté continu. Le gradateur monophasé tient, également, une place prépondérante en tant que charge non linéaire. Il est aussi utilisé, principalement, pour la commande de l'intensité des lampes, la commande de certains fours de cuisson et la régulation de puissance.

### **II.5.4 - Secteur domestique**

Le secteur résidentiel contribue pour une part importante à la pollution harmonique observée sur les réseaux. Les principaux équipements électriques perturbateurs sont les appareils électroménagers, les téléviseurs, les variateurs de lumière et les lampes fluorescentes (Fig. 2.13)

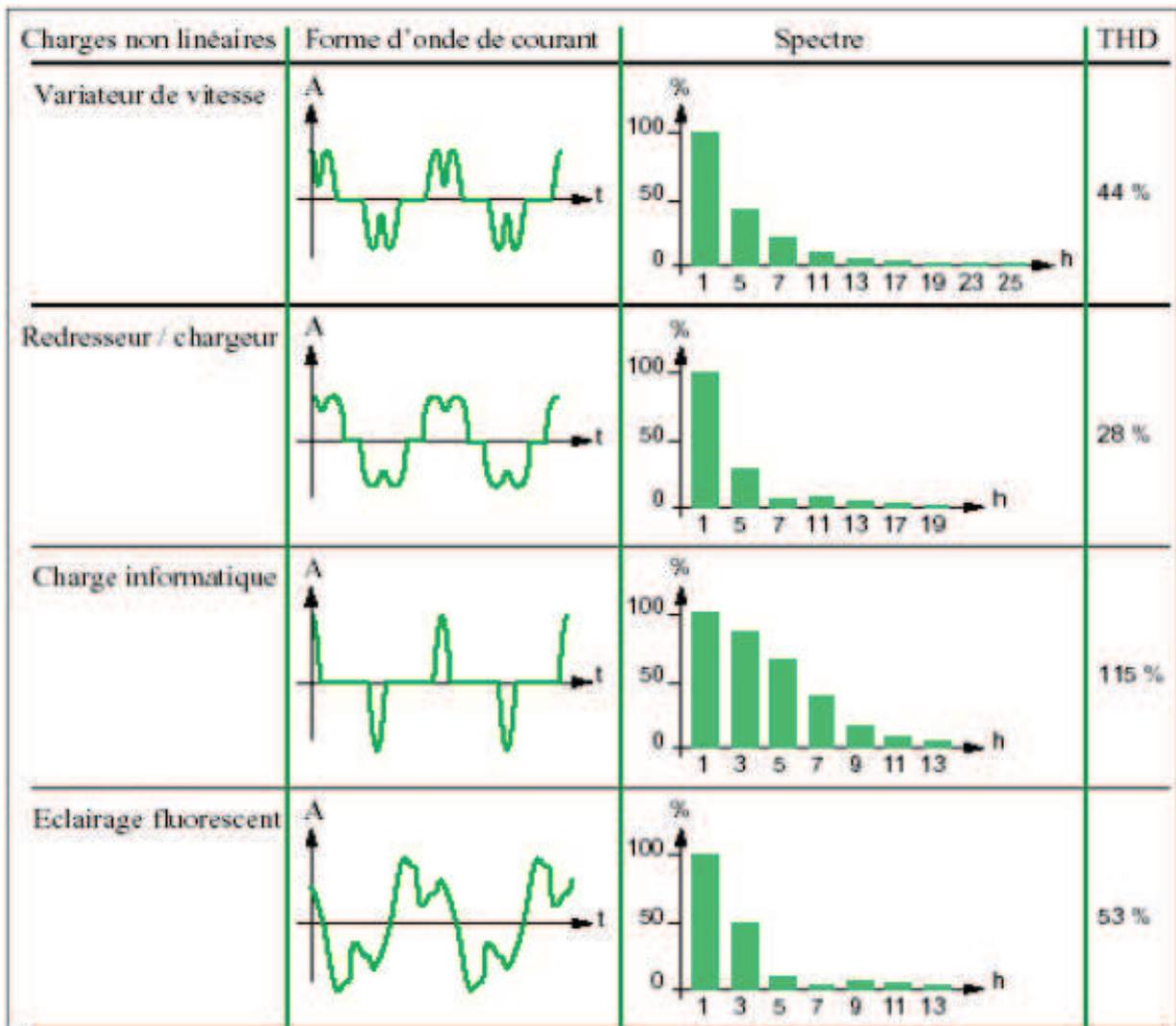


Fig. 2.13 - Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques [12].

## II.6 - CONSÉQUENCES DES PERTURBATIONS HARMONIQUES

Les harmoniques rencontrés sur les réseaux électriques (en tension ou en courant) ont un grand nombre d'effets néfastes sur le fonctionnement du réseau. La présence des courants harmoniques, qui peuvent déformer la tension, dus aux charges non linéaires sont capables de perturber le fonctionnement des autres dispositifs connectés au réseau. Les principales conséquences des effets nocifs engendrés à court terme sont rappelées dans ce qui suit.

### II.6.1 - Échauffement

Les courants harmoniques génèrent des pertes supplémentaires et par conséquent des échauffements. Ces pertes Joule dans les équipements se décomposent en la somme des pertes issues du fondamental et de celles engendrées par les harmoniques :

$$P_{Joule} = RI^2 = RI_1^2 + R \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2 \quad (2.49)$$

### **II.6.2 - Interférences avec les réseaux de télécommunication**

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de communication peut provoquer des interférences. Le courant circulant dans le réseau électrique engendre un champ magnétique qui induit un courant dans les conducteurs des réseaux de communication. L'importance des interférences dépend de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux.

### **II.6.3 - Excitation des résonances**

Des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques. Ainsi, les harmoniques sont amplifiés et ils peuvent apparaître des surtensions ou des surintensités qui détériorent les câbles et font disjoncter les fusibles. La présence des harmoniques réduit, également, le rendement des moteurs et des transformateurs en augmentant les pertes d'énergie par hystérésis et par les courants de Foucault. De plus, ces effets nocifs instantanés (échauffement, surtension, surintensité,...) provoquent un vieillissement accéléré des appareils électriques.

### **II.6.4 - Mauvais fonctionnement pour les dispositifs électriques**

En présence des harmoniques, les tensions (ou les courants) peuvent changer de signe plusieurs fois dans une demie-période du réseau. Par conséquent, tout appareil de mesure ou système de régulation numérique (les équipements de protection) dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro de grandeurs électriques peut être perturbé.

### **II.6.5 - Autres effets**

Ils sont cités ci - après :

- Augmentation du niveau sonore et de la pulsation du couple dans les machines électriques.
- Accélération du vieillissement des équipements d'éclairage et des batteries de condensateurs.
- Influence sur les relais de protection.

TAB. 2.3 - Conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau [13].

Matériels	Gêne liée à la pollution harmonique	Seuils admissibles de distorsion
Alternateurs	- Pertes supplémentaires, dans les enroulements statoriques et, principalement, dans les amortisseurs, liées à la circulation des courants harmoniques.	Distorsion de tension = 10 % (pour petites machines) Distorsion de courant = 5 % (machines de fortes puissances)
Lignes	- Pertes ohmiques supplémentaires.	Distorsion de tension = 3 % Distorsion de courant = 1.7 %
Câbles	-Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques d'ordres 3 ou homopolaires. - Pertes diélectriques liées à la distorsion de tension pouvant entraîner des détériorations. - Corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation des courants harmoniques pairs associés à une composante continue.	Distorsion de tension = 10 % Tension harmonique individuelle $\frac{U_h}{U_1} = 7\%$
Transformateurs	- Pertes supplémentaires dans les enroulements liées à la circulation des courants harmoniques. - Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault). - Risque de saturation en présence des composantes continues.	Distorsion de tension = 10 % Distorsion de courant = 7 %
Moteurs	- Pertes supplémentaires dans les enroulements, principalement, liées à la distorsion de tension, proportionnelle à $\frac{U_h^2}{h^2}$ - Limitation des performances en puissance.	Distorsion de tension = 15 % Distorsion de courant = 10 %
Circuits de protection divers de la clientèle	- Risque de déclenchements impératifs attribués aux distorsions de tension et à des particularités des circuits alimentés.	Présence de perturbation si $6\% < \frac{U_h}{U_1} < 12\%$

Lampes à décharge pour éclairage, appareils médicaux & générateurs de rayons X	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Risque de vacillement sous l'effet de tension harmonique de rang 2.</li> <li>- Perturbation par surtension en valeur de crête liée aux distorsions de la tension.</li> </ul>	Présence de perturbation si $\frac{U_h}{U_1} = 3\%$ Présence de perturbation si $\frac{U_h}{U_1} = 10\%$
Ordinateurs, électronique de puissance	- Troubles fonctionnels liés à la distorsion de tension.	Distorsion de tension = 5 %
Condensateurs de puissance	- Pertes diélectriques supplémentaires aboutissant au vieillissement du condensateur.	Tension harmonique individuelle : $\frac{U_h}{U_1} = \frac{83\%}{h}$ non cumulable avec d'autres fréquences harmoniques.

## II.7 - NORMES & REGLEMENTATION

Afin de pouvoir garantir un niveau de qualité suffisant à l'ensemble des utilisateurs, les distributeurs sont amenés à fixer ou à faire fixer des limites aux perturbations engendrées par certains utilisateurs. Pour cela, il s'agit de définir :

- D'une part, un taux de distorsion maximum permettant un fonctionnement correct de la plupart des utilisations (niveau de compatibilité).

- D'autre part, un taux de perturbations maximum pour chacun des utilisateurs, afin que les effets cumulés des différentes perturbations produites, permettent la compatibilité de fonctionnement entre tous les matériaux raccordés sur le même réseau. Tous doivent fonctionner correctement.

Par conséquent, si cette compatibilité est nécessaire entre abonnés, elle l'est également à l'intérieur des installations des abonnés eux-mêmes (tertiaire ou industriel). L'utilisateur final est tributaire du niveau de perturbations induites par les matériels qu'il installe. C'est pourquoi, il est important que les fabricants affichent clairement quels sont les niveaux de perturbations engendrées par leurs produits.

Des normes doivent, donc, fixer les niveaux de perturbations harmoniques acceptables, pour les réseaux et pour les pollueurs afin de limiter, préventivement, les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. Ces normes sont appliquées suivant 4 règles :

- Limites d'émission : Elles sont fixées soit par installation, soit par appareil. Ces limites garantissent le maintien, en tout point, des niveaux de compatibilité.

- **Niveaux d'immunité** : Ils permettent de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites.

- **Niveaux de compatibilité** : Ils sont, généralement, des taux de tension harmonique à ne pas dépasser en tout point du réseau. Le maintien de ces niveaux garantit un fonctionnement correct de tous les appareils.

- **Niveaux de planification** : Ils représentent des seuils de perturbations décidés par un gestionnaire de réseau, tel que le niveau de compatibilité qu'il ne soit pas dépassé.

Par exemple, la norme CEI 1000-2-2 pour les équipements raccordés à un réseau basse tension permet de garantir à l'utilisateur un fonctionnement de l'équipement sur un réseau perturbé dans certaines limites. Un extrait de la norme CEI 1000-2-2 est donné au tableau 2.4.

TAB. 2.4 - Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux électriques [13].

<b>Harmoniques impairs non multiples de 3</b>		<b>Harmoniques impairs multiples de 3</b>		<b>Harmoniques pairs</b>	
<b>Rang harmonique h</b>	<b>Tension harmonique %</b>	<b>Rang harmonique h</b>	<b>Tension harmonique %</b>	<b>Rang harmonique h</b>	<b>Tension harmonique %</b>
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	> 21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			> 12	0,2
25	1,5				
> 25	12.7 / h				

## II.8 – Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la fluctuation de tension et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Par conséquent, des effondrements éventuels des réseaux deviennent fortement probables.

La pollution harmonique est un problème relativement **récent**. Il apparaît de façon remarquable qu'un pollueur de réseau peut être également victime des harmoniques. Cette pollution affecte non seulement la propre installation, mais aussi les consommateurs voisins. La technologie récente permet de compenser à peu près toutes les irrégularités survenant sur les réseaux. En contrepartie, un investissement non négligeable est requis. Une telle protection s'imposera à l'avenir de plus en plus.

# Chapitre III

## *STRATEGIES DE DEPOLLUTION DES HARMONIQUES*

### **III.1- INTRODUCTION**

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 [16]. 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 [17]. Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en 2 types (courant et tension), 2 groupes de solutions de dépollution, traditionnelle et moderne, vont être étudiées.

### **III.2 - SOLUTIONS TRADITIONNELLES**

L'existence des perturbations dans un réseau électrique conduit à prendre, impérativement, des dispositions afin d'atténuer ou d'éliminer leurs conséquences sur les équipements électriques et sur les réseaux électriques. Sur cette base, il semble donc nécessaire de décrire de manière sommaire les principaux dispositifs et solutions existants utilisés pour le traitement de perturbations.

#### **III.2.1 - Surdimensionnement de l'installation électrique**

Dans ce cas, les harmoniques ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Les effets néfastes de la pollution harmonique sont à éviter pendant une durée limitée. Pour les installations nouvelles, on procède au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Dans le cas d'installations existantes, on décline les équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques (câbles du neutre, transformateur). Cette méthode ne permet pas de tirer profit du potentiel réel de l'installation. Il en résulte un accroissement important du coût de l'installation.

#### **III.2.2 - Augmentation de la puissance de court-circuit**

En l'absence de tout phénomène de résonance, la puissance harmonique globale augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue. On s'efforcera alors d'alimenter les équipements perturbateurs à partir du point du réseau où la puissance de court-circuit disponible est la plus élevée.

Les courants harmoniques des charges non linéaires étaient modélisés par des sources de courant indépendantes du réseau. Dans la réalité, ce modèle est très approximatif. Les

courants harmoniques sont influencés par l'impédance du réseau amont. Lorsque celle-ci croît, en général les courants harmoniques décroissent. Ce qui signifie que pour augmenter l'impédance, on augmente la puissance de court-circuit. Des essais ont été réalisés sur une alimentation à découpage, en modifiant l'impédance de la source (TAB. 3.1). On peut constater que les harmoniques de courant de valeurs les plus élevées décroissent fortement lorsque l'impédance de la source croît.

**III.2.3 - Transformateur à couplage spécial**

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag (Fig. 3.1), empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

TAB. 3.1 - Courants harmoniques d'une alimentation à découpage en fonction de l'impédance de source [12].

$Z_s$ [%]	Facteur de puissance $F_p = \frac{P}{S}$	$I_3$ [%]	$I_5$ [%]	$I_7$ [%]	$I_9$ [%]	$I_{11}$ [%]	$I_{13}$ [%]	Taux de distorsion en tension
0.25	0.64	87	64	38	15	1	7	2.8
0.5	0.65	85	60	33	11	4	7	3.5
1	0.68	81	52	24	6	7	6	5.4
2	0.72	76	42	14	7	6	3	7.5
4	0.75	69	29	8	8	4	4	11.2
6	0.77	63	21	8	6	3	3	14.2
8	0.78	59	17	8	5	3	2	16.8

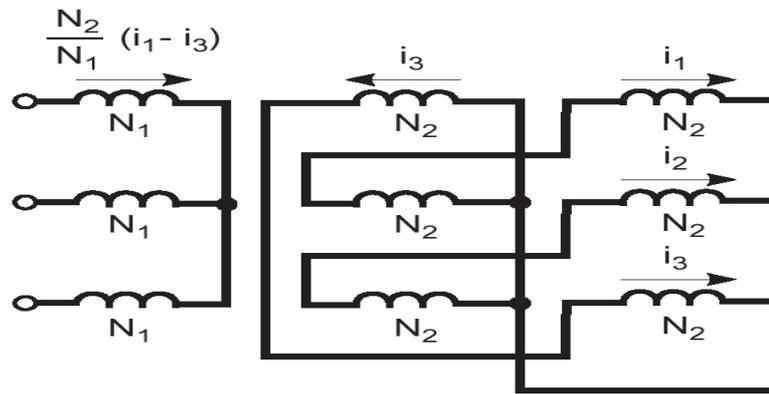


Fig. 3.1 - Transformateur à secondaire zigzag et atténuation des harmoniques multiples de 3 [12].

L'utilisation des transformateurs primaires étoiles (sans neutre) et à secondaires zigzags est une solution intéressante. Ce couplage permet d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang  $3 \cdot h$  ne circulent pas au primaire du transformateur et l'impédance  $Z_s$  ne dépend que des enroulements secondaires.

### III.2.4 - Modification du convertisseur polluant

Afin de limiter les risques de pollution d'un réseau électrique, il est parfois possible de remplacer la structure du convertisseur de puissance et/ou de sa commande pour intervenir, directement, sur la source des perturbations. Plusieurs solutions sont envisageables, parmi elles, on cite [18] :

#### III.2.4.1 - Redresseurs dodécophasés

Il s'agit de connecter 2 ponts triphasés, judicieusement déphasés, en parallèle côté réseau et reliés côté redressé. Le déphasage est obtenu à l'aide d'un transformateur à 2 secondaires bobinés l'un en triangle et l'autre en étoile (Fig. 3.2).

#### III.2.4.2 - Méthodes d'injection d'harmonique dans le neutre

Ces techniques réduisent de manière significative les harmoniques créés au secondaire d'un transformateur triphasé alimentant un pont redresseur à diodes, en injectant un courant de fréquence multiple de 3 dans le neutre [19].

III.2.4.3 - Transformateurs de réjection de l'harmonique 3

L'originalité est de réduire l'influence de l'harmonique 3 en insérant dans le circuit, un transformateur étoile-triangle ou zigzag-triangle, fonctionnant à vide, pour créer une circulation de flux de fréquence multiple de 3[20].

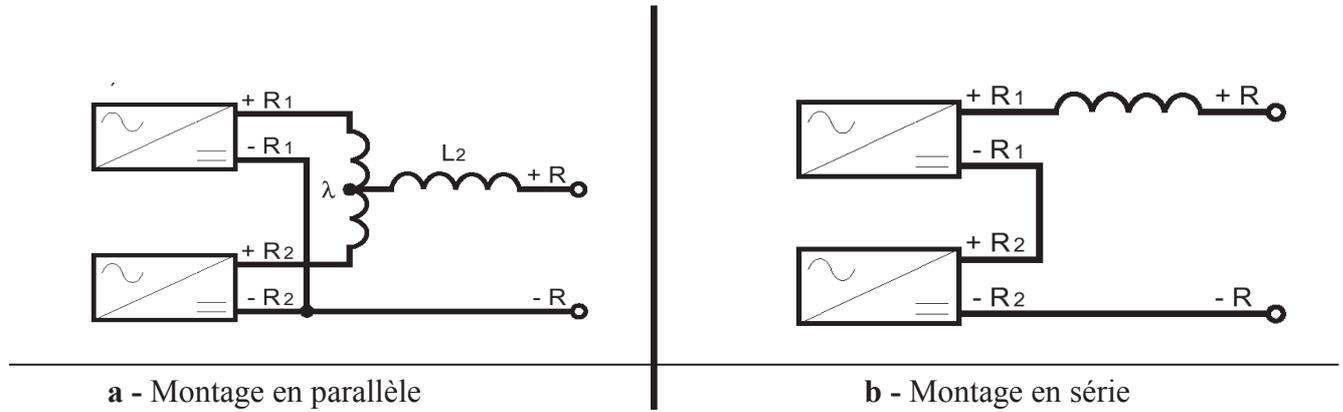


Fig. 3.2 - Montage de 2 ponts redresseurs.

III.3 - SOLUTIONS NOUVELLES

III.3.1 - Filtre actif ou conditionneur actif d'harmoniques

Le développement récent des semi-conducteurs de puissance, entièrement, commandables, les thyristors, les GTO et les IGBT et en particulier, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal ont permis de développer un moyen moderne et efficace d'élimination des perturbations harmoniques : le filtre actif ou compensateur actif d'harmoniques. Un filtre actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution harmonique (Fig. 3.3). A la différence, un conditionneur actif de puissance est un dispositif qui satisfait la fonction de dépollution de plusieurs perturbations telles que les chutes de tension, les déséquilibres..., incluant le traitement harmonique [21,22].

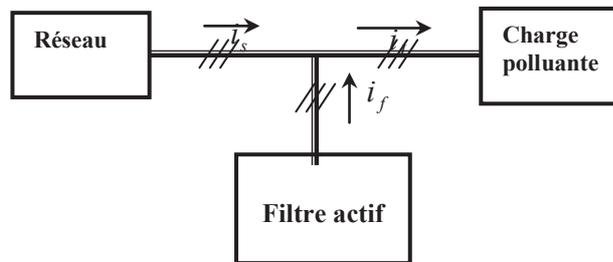


Fig. 3.3 - Principe de connexion du filtre actif.

**III.3.2 - Filtre actif de puissance parallèle**

Le filtre actif parallèle (Fig.3.4) peut être considéré comme un générateur de courant ou de tension. Dans le cas de générateur de courant, ce filtre est commandé de façon à injecter au réseau des courants égaux à ceux générés par la charge, mais de phases opposées. Le courant de source après compensation est sinusoïdal. Par contre, la tension au point de connexion ne sera sinusoïdale que si la source de tension du réseau est exempte d’harmoniques. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir. En plus, le filtre peut aussi compenser le courant réactif mais avec un dimensionnement plus important.

Lorsque celui-ci se comporte comme un compensateur de courants harmoniques, il permet de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charges non linéaires. Par contre, lorsqu’il se comporte comme un compensateur de tension harmonique, il permet alors de maintenir sinusoïdale la tension au point de raccordement quel que soit le courant absorbé par la charge et quel que soit la qualité de la source de tension. En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son indépendance totale vis-à-vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables [22].

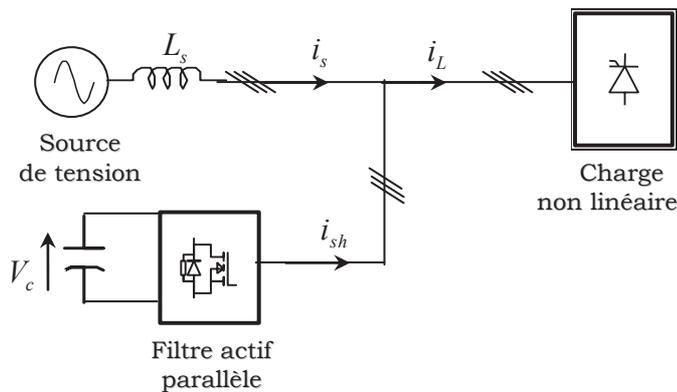


Fig. 3.4 - Filtre actif parallèle.

**III.3.3 - Filtre actif de puissance série**

Ce type de compensateur connecté en série sur le réseau de distribution se comporte comme une source de tension harmonique qui s’oppose à une éventuelle tension harmonique venant de la source. Il s’oppose, également, à celle provoquée par la circulation du courant harmonique de la charge polluante à travers l’impédance du réseau rendant sinusoïdale la tension aux bornes de la charge polluante. Son rôle d’isolateur empêche les courants harmoniques de remonter vers le réseau [23]. Dans ce cas, le filtre protège les installations

sensibles des perturbations provenant du réseau tel que les harmoniques, les surtensions et les déséquilibres. Si la charge génère des courants harmoniques, le filtre série ne permet pas de corriger ces courants et en cas de court-circuit de la charge, le compensateur doit supporter toute la tension du réseau et tout le courant de court-circuit. D'où, un moyen de protection s'avère dispensable qui lui compense soit les courants harmoniques consommés par la charge ou par la distorsion de tension déjà présente sur le réseau [24]. Le montage est représenté à la figure 3.5.

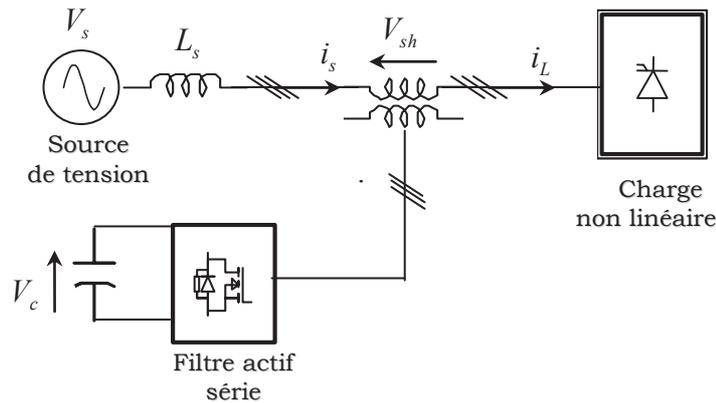


Fig. 3.5 - Filtre actif série.

Pour ce cas, le filtre actif série se comporte comme une impédance infinie aux fréquences harmoniques et comme une impédance nulle à la fréquence fondamentale. Son rôle d'isolateur empêche ainsi les courants harmoniques de remonter vers le réseau. Toutefois, la mise en œuvre de la topologie d'un filtre actif série présente quelques inconvénients :

- Il est toujours parcouru par la totalité du courant absorbé par la charge, y compris le courant fondamental.
- En cas de court-circuit de la charge, le filtre actif de puissance série devient la seule charge du réseau et risque d'être détruit. Ceci nécessite des protections supplémentaires.

#### III.3.4 - Filtre actif de puissance hybride

C'est l'association de filtres actifs séries de faibles puissances à des filtres passifs. Cette solution semble être prometteuse car elle réduit le dimensionnement du filtre actif de puissance, par conséquent, leurs prix. De plus, leurs potentialités d'application ne cessent de s'accroître et la fréquence de commutation est, considérablement, réduite [25]. Différentes configurations existent, parmi elles, on présente :

III.3.4.1 - Filtre actif de puissance série en parallèle avec des filtres passifs parallèles

Le schéma de principe de ce système de filtrage est donné par la figure 3.6. Il est constitué de filtres passifs accordés aux fréquences des harmoniques prépondérantes tels que le 5<sup>ème</sup> et le 7<sup>ème</sup> harmonique et d'un filtre actif série dont le rôle est de renforcer l'efficacité des filtres passifs en empêchant les courants harmoniques de remonter. Il réduit, ainsi, les risques d'anti-résonance entre les éléments du filtre passif et l'impédance du réseau [26].

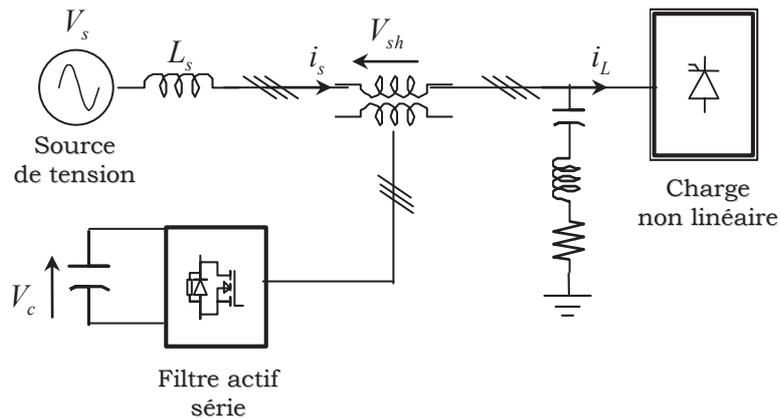


Fig. 3.6 - Combinaison d'un filtre actif série en parallèle avec un filtre passif parallèle.

III.3.4.2 - Filtre actif de puissance série en série avec des filtres passifs parallèles

Dans cette configuration, le filtre actif est placé en série avec les filtres passifs parallèles telle que le montre la figure 3.7. Cette structure à 2 avantages. D'une part, le courant qui le traverse est moins important. Par conséquent, la puissance du filtre actif série est plus faible que celle du filtre hybride. D'autre part, le filtre actif série n'étant plus connecté en série avec la charge, par conséquent, en cas de court-circuit dû à cette même charge, le filtre actif n'est plus affecté [27].

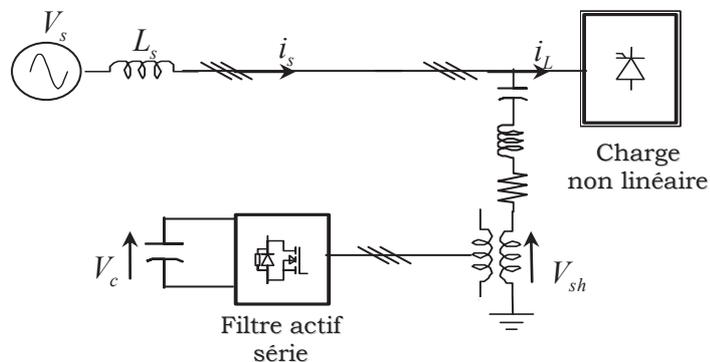


Fig. 3.7 - Mise en série d'un filtre actif série avec un filtre passif parallèle.

III.3.4.3 - Conditionneur actif de puissance

Nous remarquons d’après ce qui précède, que ni le filtre actif de puissance parallèle, ni le filtre actif de puissance série n’est capable de réaliser un filtrage complet donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant exempt d’harmoniques du côté du réseau [28].

Cet objectif n’est atteint, qu’en utilisant un filtre actif de puissance mixte composé de 2 filtres actifs de puissance, l’un connecté en série et l’autre en parallèle avec la charge, comme le montre la figure 3.8.

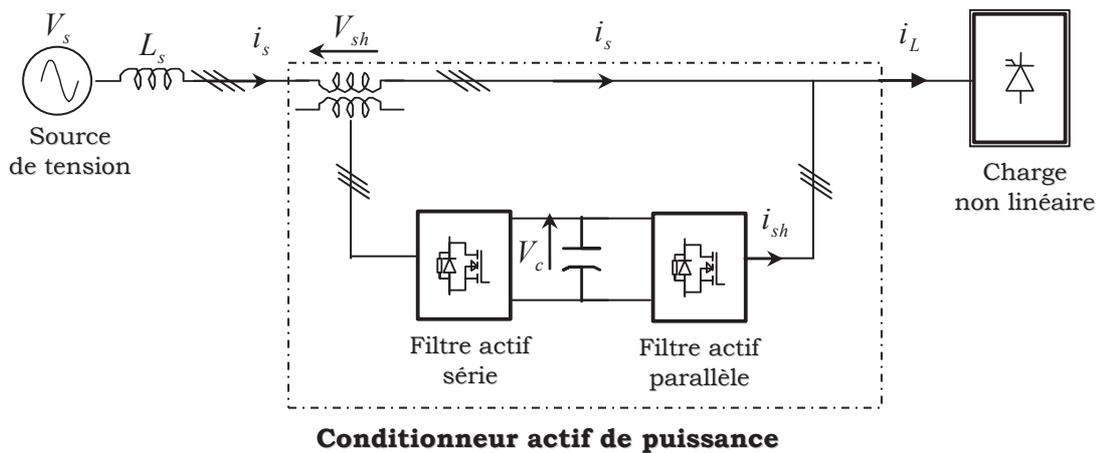


Fig. 3.8 - Combinaison d’un filtre actif parallèle avec un filtre actif série: Conditionneur actif de puissance [28].

Cette structure mixte appelée conditionneur actif de puissance constituera la principale application des filtres actifs de puissance dans l’avenir en restant pour l’instant très onéreuse.

III.3.4.4 - Redresseur à principe de la MLI

Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d’absorber un courant sinusoïdal. Les convertisseurs propres, tels que les redresseurs MLI, sont formés par des semi-conducteurs à fermeture et ouverture commandées, auxquels sont associées des diodes (Fig. 3.9). Ils utilisent, de façon générale, la technique de commutation dite MLI. Elle a pour rôle de repousser les harmoniques vers les fréquences élevées [29]. Il existe 2 grandes applications utilisant ces convertisseurs :

- Fonctionnement en convertisseur d’énergie à faible taux de pollution harmonique et à consommation de puissance ne réactive nulle. Ce convertisseur permet une consommation ou un renvoi d’énergie active sur le réseau.

- Fonctionnement en compensateur d'énergie réactive à forte dynamique et à encombrement réduit.

L'application principale est la compensation de la fluctuation rapide de la tension (flicker) et la stabilisation de réseau à haute tension.

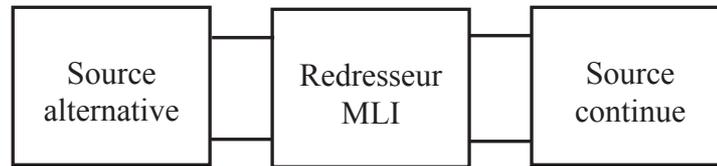


Fig. 3.9 - Schéma de principe de convertisseur à MLI.

#### III.4 - SOLUTIONS NON CONVENTIONNELLES

En plus des solutions classiques et modernes déjà décrites, d'autres solutions plus récentes sont apparues pour le traitement des perturbations. Parmi elles, on cite :

##### III.4.1- Système Improved Power Quality AC-DC Converter IPQC

Il a pour rôle d'alimenter, d'une part, une charge non linéaire et d'autre part de compenser de part sa commande toutes les charges non linéaires avoisinantes, sources de pollution harmonique, comme le montre la figure 3.10 [30]. Les avantages rencontrés lors de l'utilisation de cette solution d'après leurs auteurs sont :

- Amélioration du facteur de puissance.
- Amélioration du contenu harmonique du courant de source.
- Fonctionnement du redresseur actif dans les 4 quadrants.
- Non utilisation d'un filtre actif de puissance parallèle.

Cependant des inconvénients existent. Parmi elles, on cite :

- Implémentation de son circuit de protection très complexe.
- Charges non linéaires à traiter doit avoisiner le redresseur actif.

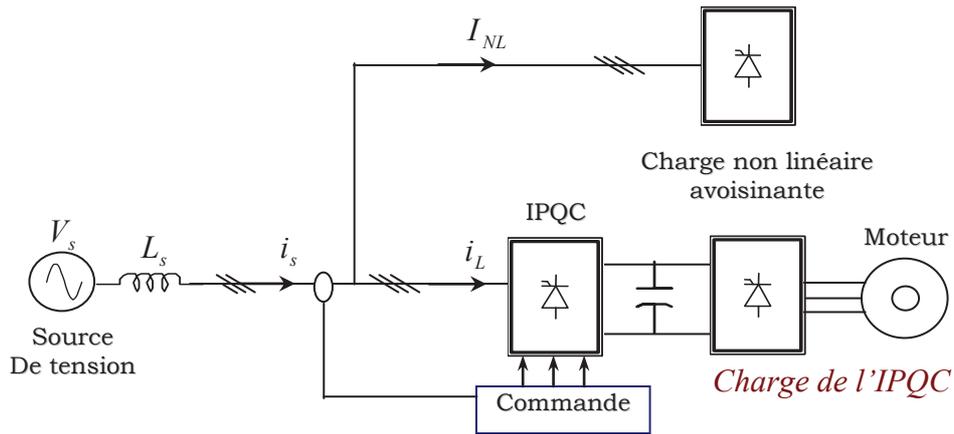


Fig. 3.10 - Système IPQC.

### III.4.2 – Système Power Line Communication PLC

Il est basé sur une nouvelle configuration d'onduleur jouant le rôle de filtre actif de puissance où chaque phase du compensateur est reliée, différemment, à la même phase monophasée de la source, comme le montre la figure 3.11 [31].

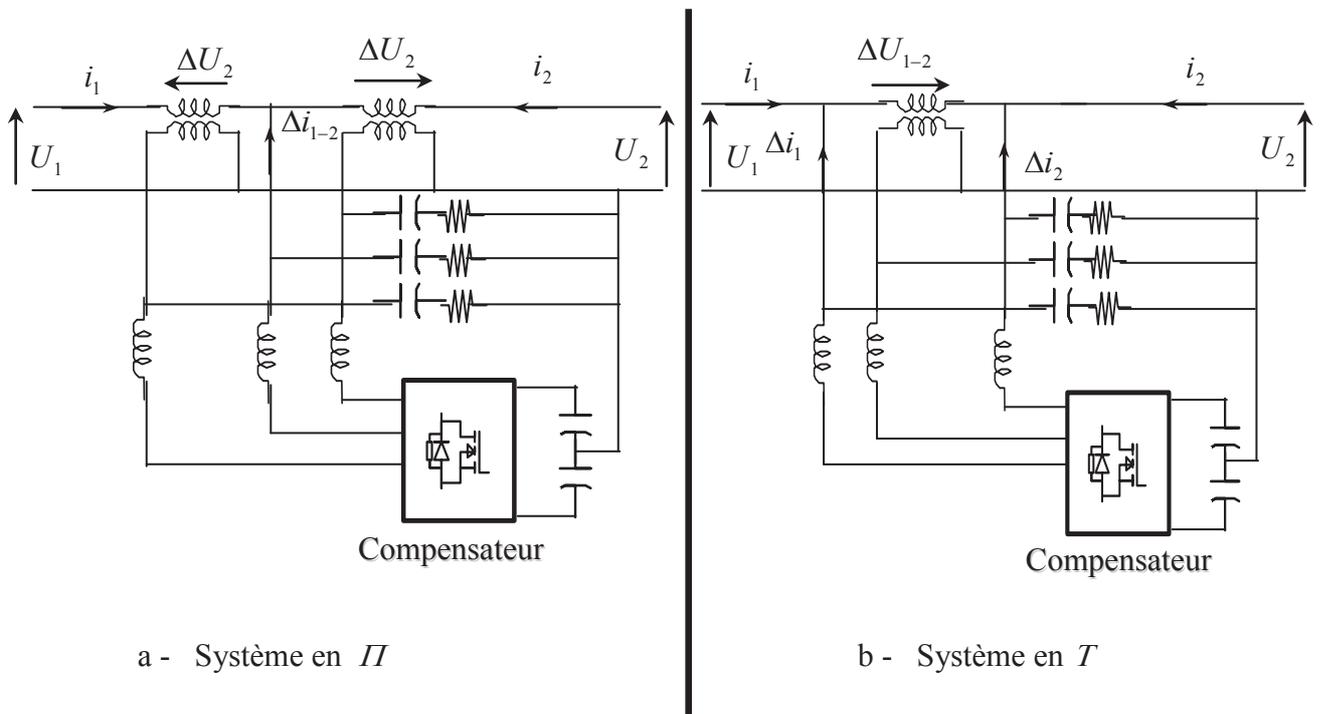


Fig. 3.11 - Système PLC.

### III.4.3 - Filtrage actif à l'aide d'une machine synchrone à double alimentation

Cette solution est d'un intérêt certain car elle présente les avantages suivants :

- Compensation sélective d'harmonique.
- Réduction de l'encombrement lié à ce mode de filtrage. Cet avantage est, particulièrement, intéressant pour des dispositifs de filtrage dits embarqués.
- Adaptabilité aux variations de la fréquence du réseau.
- Pertes joules dues au régime fondamental, principalement, constituées des pertes dans la résistance du circuit bouchon, sont faibles pour ce type de montage. Pour le régime harmonique, ces pertes sont dissipées au niveau des résistances statorique et rotorique de la machine.

Toutefois, ce mode de filtrage présente quelques inconvénients. Parmi elles, on note :

- Non possibilité de filtrer plusieurs harmoniques simultanément et efficacement.
- Risques de résonance entre le réseau, la machine et le circuit bouchon ne sont pas écartés, contrairement à l'emploi de filtres actifs constitués d'onduleurs [32].

### III.5 - CONCLUSIONS

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans un réseau électrique BT. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

- Le filtre actif parallèle peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et les déséquilibres.
- Le filtre actif série peut être installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

### **Chapitre III===== STRATEGIES DE DEPOLLUTION DES HARMONIQUES**

- La combinaison parallèle-série active est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût. Ces solutions peuvent être des solutions futures très prometteuses.

# Chapitre IV

## METHODES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES DU FAP

## IV.1- INTRODUCTION

Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle [53]. La méthode de détection harmonique est la partie importante de FAP elle a la capacité de déterminer les attributs spécifiques des harmoniques (fréquence, amplitude, phase, le temps d'occurrence, de la durée et de l'énergie) à partir d'un signal d'entrée (qui peut être tension ou courant) en utilisant un algorithme mathématique particulier [54]. Il existe deux grandes approches qui ont émergé pour la détection harmonique, à savoir les méthodes dans le domaine temporel et les méthodes dans le domaine fréquentiel [55]. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- ✓ Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante,
- ✓ Identification à partir de la détection du courant de la source,
- ✓ Identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle [9].c'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans notre travail.

Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles :

La première famille utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques de 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 capacité de calcul [56].

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 total [57].

Dans ce chapitre on va présenter la commande du filtre actif, pour différentes méthodes d'identification des harmoniques à savoir : la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie de référentiel synchrone (dq) et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr) et enfin la théorie proposée [58].

**IV.2- TECHNIQUES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES**

Nouvelles méthodes d'identification donnent le choix de compenser un, plusieurs ou voire même tous les types de courants perturbateurs. En effet, en se basant sur la régulation de la tension continue et sur celles du réseau électrique aux points de raccordement, nous pouvons compenser à la fois tous les courants perturbateurs, tout en offrant la possibilité de réguler la tension de la charge [59]. Cette méthode, qui ne peut être implantée que numériquement, ne garantit pas une compensation parfaite de la puissance réactive, de même que la régulation de tension n'assure pas toujours une bonne qualité à la tension de la charge.

Une autre méthode, appelée méthode de détection synchrone, reposant sur la transformée de Park a été proposée [60]. Cette méthode se base essentiellement sur le calcul de la pulsation fondamentale obtenue par une PLL. Cela exige une précision parfaite du calcul de cette pulsation afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés.

Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées [61]. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, afin de pouvoir compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement, cette méthode nous a semblé la mieux appropriée [62].

Le courant de référence est l'élément clé qui assure le bon fonctionnement de l'FAP. L'estimation du signal de référence est initiée par la détection de signaux de tension / courant essentiels afin de recueillir les informations nécessaires pour les variables de système d'identification. Les variables de tension à détecter sont la tension de la source ( $v_s$ ), la tension du bus continu de l'onduleur ( $v_{dc}$ ) et la tension de référence ( $v_{dc\ ref}$ ). Pour le courant les variables typiques de courant ils sont le courant de charge ( $i_l$ ) et le courant injecter par l'onduleur ( $i_f$ ).

Sur la base de ces variables de système, les signaux sont estimés dans le domaine fréquentiel ou temporel. La Figure 4.1 illustre les techniques d'estimation de signal de référence pris en considération.

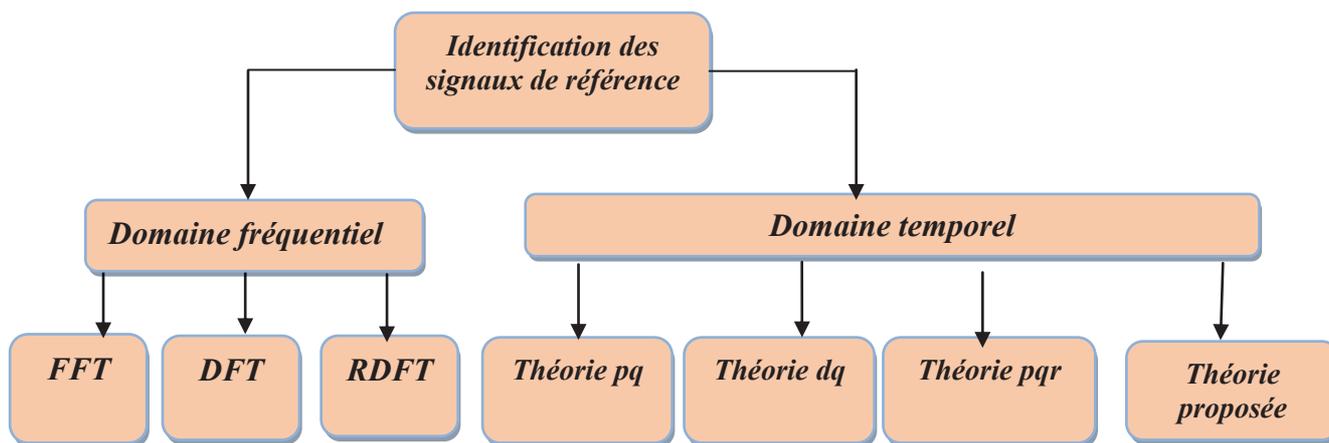


Fig.4.1- Les techniques d'identification des harmoniques

### IV.2.1- Identification dans le Domaine Fréquentiel

Les algorithmes appartenant à ce domaine sont basés sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs distordues (courants ou tensions) afin d'en extraire les signaux de compensation. En utilisant la transformée de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont d'abord séparées des signaux harmoniques polluants et sont ensuite combinées pour générer les consignes. La fréquence de commutation des semi-conducteurs du filtre actif est généralement maintenue plus grande que deux fois la plus élevée des fréquences harmoniques dans l'objectif d'avoir une compensation effective [63]. L'application on-line de la transformée de Fourier (système d'équations non linéaires) est un calcul encombrant ; il en résulte un temps de réponse relativement lent.

#### IV.2.1.1- Transformée de Fourier rapide (FFT)

Parmi les méthodes d'identification les plus anciennes, nous pouvons citer la méthode de la transformée de Fourier rapide (Fast Fourier Transform) (FFT) dans le domaine fréquentiel. Cette méthode est bien adaptée aux charges dont le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne compenser que les plus prépondérants. Pour cela, une grande puissance de calcul est nécessaire afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques [65].

Dans son principe, la transformée de Fourier est appliquée au signal capté de tension ou de courant. Les composantes harmoniques du signal sont d'abord séparées en éliminant la composante fondamentale après on applique la transformée de Fourier inverse pour estimer le signal de référence de compensation dans le domaine temporel. Le principal inconvénient de cette technique est le calcul difficile des coefficients de Fourier. Ceci fait qu'il est impossible pour une application en temps réel avec différentes charges dynamiques [55].

#### IV.2.1.2- Transformée de Fourier discrète (DFT)

La transformation de Fourier discrète (DFT) : s'applique aux signaux discrets périodiques. Est une transformation mathématique des signaux discrets qui donne à la fois l'amplitude et la phase de l'harmonique souhaité [67].

$$\bar{X}_h = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) - j \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot h \cdot n}{N}\right) \quad (4.1)$$

$$\bar{X}_h = X_{hr} + j \cdot X_{hi} \quad (4.2)$$

$$|\bar{X}_h| = \sqrt{X_{hr}^2 + X_{hi}^2} \quad (4.3)$$

Avec

$$\varphi_h = \arctan\left(\frac{X_{hi}}{X_{hr}}\right) \quad (4.4)$$

Où :

- ✓ N est le nombre d'échantillons fondamentale par période ; x(n) est le signal d'entrée (tension ou courant) au point N ;
- ✓  $X_h$  est le vecteur de Fourier complexe de la  $h^{em}$  harmonique du signal d'entrée ;
- ✓  $X_{hr}$  est la partie réelle de  $X_h$ ;  $X_{hi}$  est la partie imaginaire de  $X_h$ .  $|X_h|$  est l'amplitude du vecteur;  $\varphi_h$  est la phase du vecteur [68].

#### IV.2.1.3- Transformée de Fourier discrète récursive (DFTR)

La transformée de Fourier discrète récursive (DFTR) utilise le même principe que la DFT, mais la (DFTR) est calculée sur une fenêtre glissante. La fenêtre décale chaque temps d'échantillonnage avec un nombre fixe d'échantillons. Ainsi, l'analyse DFT peut effectivement être effectuée sur les échantillons nouvellement obtenus. La seule différence entre le réel et

les fenêtres précédentes sont les premiers et derniers échantillons. Tous les autres échantillons sont les mêmes par conséquent, il n'est pas nécessaire d'échantillonner à nouveau [69].

## **IV.2.2- Identification dans le Domaine Temporel**

Le principe de la stratégie d'identification dans le domaine temporel est d'extraire par filtrage les harmonique de tension ou de courant en temps réel, en séparant le fondamental des harmoniques. Cette technique utilise des formules algébriques faciles à implanter et réduit considérablement l'effort de calcul ; s'ajoute à cela le fait qu'elle permet d'identifier tous les harmoniques ; d'autre part elles sont largement utilisées pour le calcul de courant de référence [71]. Les algorithmes principalement utilisés dans le domaine temporel sont : la théorie de puissance instantanée active-réactive (pq) et la théorie du référence synchrone (dq), ainsi que la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr).

### **IV.2.2.1- Théorie de la puissance instantanée (pq)**

En 1983, Akagi et al, ont proposé «La théorie généralisée de la puissance réactive instantanée en circuits triphasés » également connu comme la théorie (pq). Elle est basée sur les valeurs instantanées dans les systèmes d'alimentation triphasés avec ou sans neutre, en plus elle est valable pour les opérations en régime permanent ou transitoire [61].

La théorie (pq) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées  $(\alpha, \beta)$ . Elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit également un système de référence fixe, où les coordonnées  $(\alpha, \beta)$  sont orthogonales les unes aux autres [35].

La transformation se fait à partir de la relation suivant :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Si on applique cette relation sur le courant de charge et la tension de la source on trouve :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{la} \\ i_{lb} \\ i_{lc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Pour la puissance active et réactive dans le plan  $\alpha$ - $\beta$  il sera :

$$\begin{cases} p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \\ q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{cases} \quad (4.8)$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés on trouve :

$$\begin{cases} p = v_{sa} i_{la} + v_{sb} i_{lb} + v_{sc} i_{lc} \\ q = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{sa} - v_{sb}) i_{lc} + (v_{sb} - v_{sc}) i_{la} + (v_{sc} - v_{sa}) i_{lb}] \end{cases} \quad (4.9)$$

On pose :

$$\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \quad (4.10)$$

Et à partir de l'expression (4.8) on a :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées  $p$  et  $q$  ont pour expression :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (4.12)$$

Avec

- ✓  $\bar{p}, \bar{q}$ : Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.
- ✓  $\tilde{p}, \tilde{q}$ : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant.
- ✓ Pour l'extraction de puissance alternative on utilise la méthode de filtrage illustré sur la Figure 4.2.

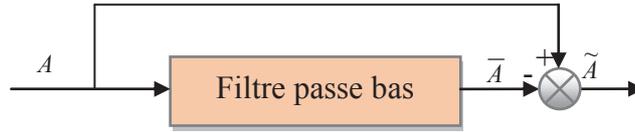


Fig.4.2- Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q

On remplace (4.12) dans (4.11) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Donc le courant harmonique sera déterminé par la relation :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Si on applique la transformation inverse de Clark (Figure 4.3) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

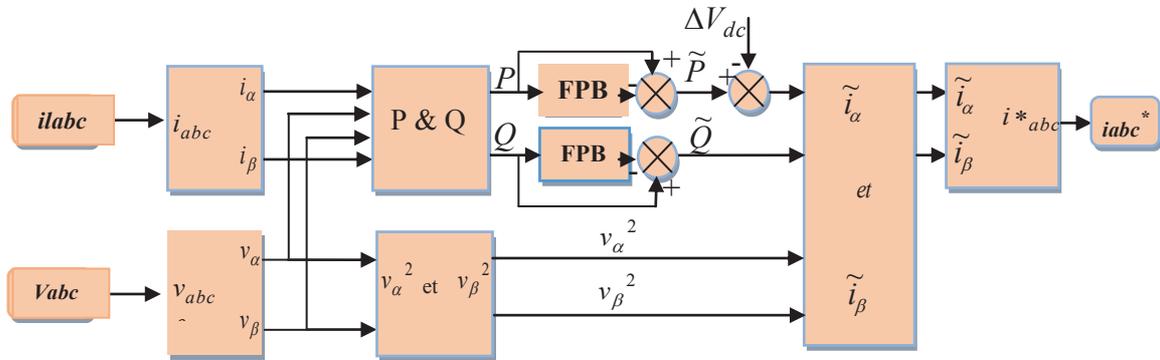


Fig.4.3- Principe de la méthode (pq)

#### IV.2.2.2- Théorie du référentiel synchrone (dq)

Le principe d'identification sélectif à base de référentiel synchrone de Park (dq) est basé sur la transposition des systèmes triphasés des courants de charge à un axe diphasé tournant (dq) tourne par une vitesse angulaire de la fréquence harmonique désirée a filtré [72]. Ainsi, dans l'axe d-q, l'harmonique choisi à identifie devient un signal continu, et les autres harmoniques changent leur fréquences, ils prennent la valeur  $h = \pm 6\omega$ . Cette opération permet

de séparer cette composante des autres courants par un filtrage simple à réaliser (filtre passe bas de premier ordre) [73].

Le terme fondamental de la théorie (dq) est le résultat de la transformation vectorielle des signaux d'entrée (les courants de charge pour notre cas) qui sont initialement réalisés dans les coordonnées abc (repère de référence fixe) vers les coordonnées (dq) (repère tournant avec la fréquence fondamentale) par la transformation de Park (Figure 3.5) [68, 74].

Il y a cinq étapes pour calculer les courants de référence pour un filtre actif parallèle [22,17] :

- 1) **Étape 1** : Transformer les courants de charge triphasés ( $i_{1a}$ ,  $i_{1b}$ ,  $i_{1c}$ ) à ( $i_{1\alpha}$ ,  $i_{1\beta}$ ,  $i_{10}$ ) en utilisant l'équation (4.16) :

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{10} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

- 2) **Étape 2** : Transformer les courants  $i_{1\alpha}$  et  $i_{1\beta}$  à  $i_{1d}$  et  $i_{1q}$  par :

$$\begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Où  $\omega$  est la pulsation électrique.

Le schéma vectoriel de passage du repère (abc) vers le repère (dq) est représenté dans la Figure 4.4.

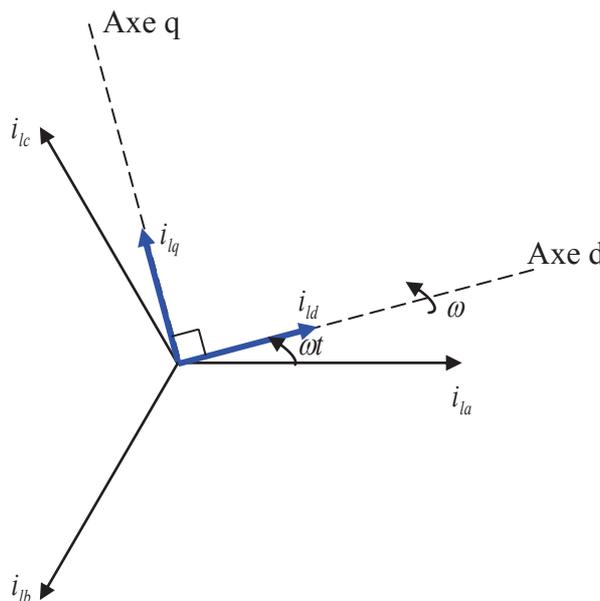


Fig.4.4- Représentation vectoriel de passage de repère abc vers le repère (dq)

On peut décomposer les courants  $i_{ld}$  et  $i_{lq}$  en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue, donc on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{ld} \\ \dot{i}_{lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{i}_{ld} + \tilde{i}_{ld} \\ \bar{i}_{lq} + \tilde{i}_{lq} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Avec :

- ✓  $\bar{i}_{ld}, \bar{i}_{lq}$  : Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère dq.
- ✓  $\tilde{i}_{ld}, \tilde{i}_{lq}$  : Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère dq.

**3) Étape 3 :** De l'étape 2, il est montré que les courants de charge se composent de deux termes. Pour cette étape, le filtre passe-bas (FPB) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques  $\tilde{i}_{ld}, \tilde{i}_{lq}$  comme le montre la Figure 4.5.

**4) Étape 4 :** Le passage des composantes harmoniques ( $\tilde{i}_{ld}, \tilde{i}_{lq}$ ) de repère dq vers le repère  $\alpha\beta$  ( $\tilde{i}_{l\alpha}, \tilde{i}_{l\beta}$ ) en utilisant l'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{l\alpha} \\ \tilde{i}_{l\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{ld} \\ \tilde{i}_{lq} \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

**5. Étape 5 :** Calcule des courants de référence triphasés ( $i_a^*, i_b^*, i_c^*$ ) à partir de l'équation (4.20) :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{l\alpha} \\ \tilde{i}_{l\beta} \\ \tilde{i}_{l0} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

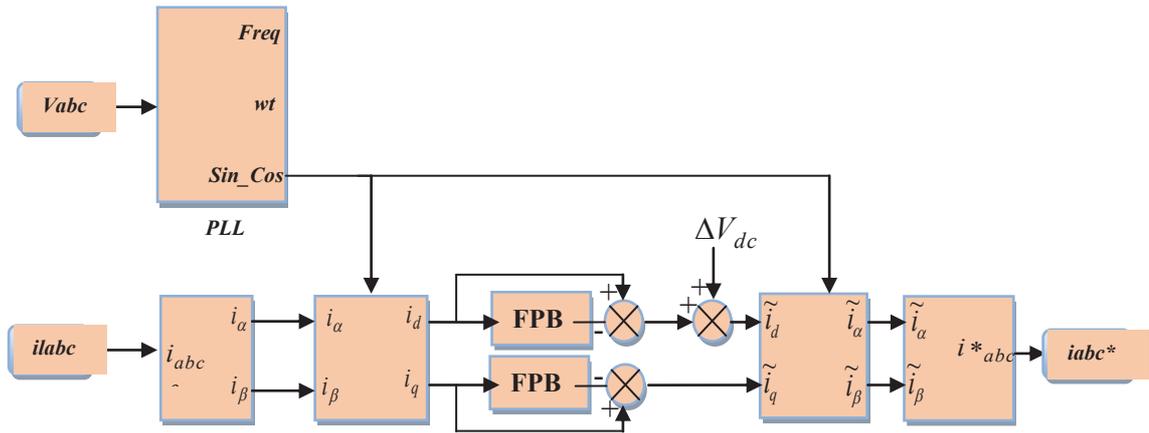


Fig.4.5- Principe de la méthode (dq)

Afin d'échanger une puissance contrôlée, l'onduleur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (PLL : Phase locked loop) [43, 50].

**IV.2.2.3- Théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr)**

Cette théorie a été introduite par H .Kim et al, dont le principe n'est pas très différent de la théorie (pq) sa structure générale est représentée sur la Figure 4.6.

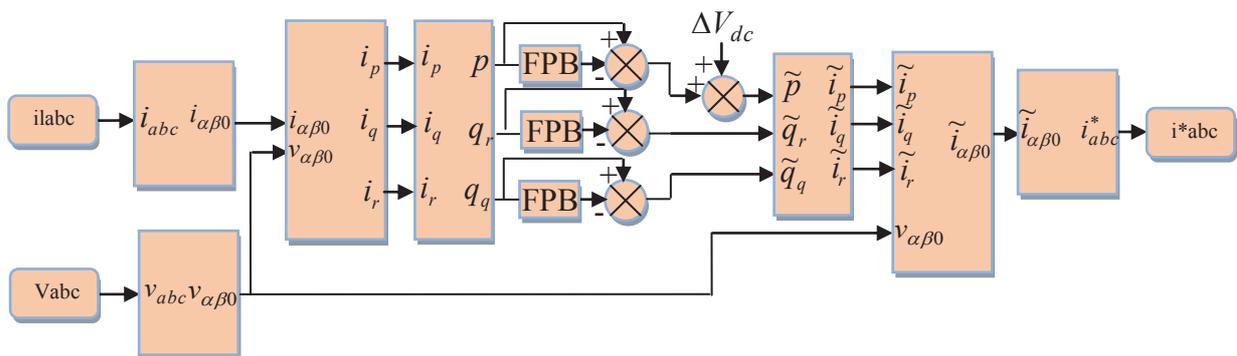


Fig.4.6- Principe de la méthode (pqr)

La théorie propose un référentiel spatial (pqr) pour exposer les grandeurs électriques et identifier les harmoniques à compenser. L'axe p est placé sur le vecteur tension, q est un axe situé sur le plan ( $\alpha\beta 0$ ) et perpendiculaire à p et r est perpendiculaire aux deux axes p et q comme présenté dans la Figure 4.7 [75,86].

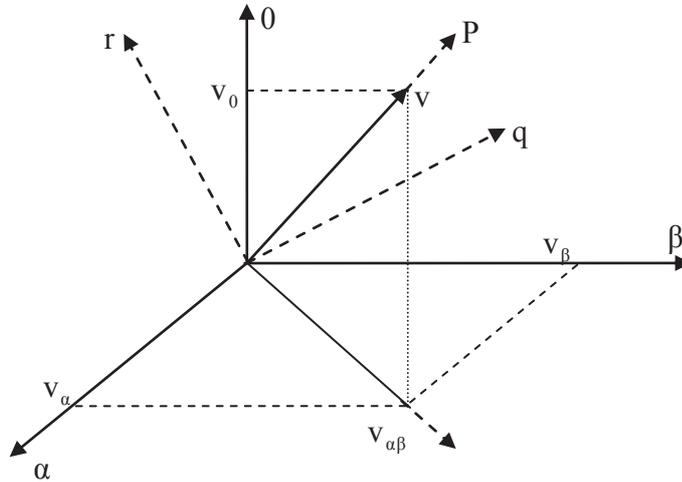


Fig.4.7- Relation entre le plan ( $\alpha\beta 0$ ) et le plan (pqr)

Le passage du repère abc au repère ( $\alpha\beta 0$ ) est assuré par la relation :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$$v_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

Ainsi, le vecteur unité sur l'axe p qui à la même direction que le vecteur de tension est donné par l'équation suivante :

$$v_{up} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.24)$$

Avec :

$$v_{\alpha\beta 0} = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2 + v_0^2} \quad (4.25)$$

Et pour toute vecteur unité  $v_{uq}$  sur le plan  $(\alpha\beta)$  qui est orthogonal à  $v_{up}$ , est donné par :

$$v_{uq} = \frac{1}{v_{\alpha\beta}} \begin{bmatrix} -v_{\beta} \\ v_{\alpha} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Avec :

$$v_{\alpha\beta} = \sqrt{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \quad (4.27)$$

Donc, si  $v_{uq}$  est le vecteur unité sur l'axe q, alors le vecteur unité sur l'axe r est donné par :

$$v_{ur} = v_{up} \cdot v_{uq} \quad (4.28)$$

Alors :

$$v_{ur} = \frac{1}{v_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} -v_0 v_{\alpha} \\ v_{\alpha\beta} \\ -v_0 v_{\beta} \\ v_{\alpha\beta} \\ v_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Dans ce cas il est possible de faire la projection de tous les vecteurs sur les vecteurs unitaires  $v_{up}$ ,  $v_{uq}$  et  $v_{ur}$ . Le vecteur courant dans le système  $(\alpha\beta 0)$  est donné par :

$$i_{\alpha\beta 0} = \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Donc les projections  $i_p$ ,  $i_q$  et  $i_r$  sur les axes p, q et r, seront données par :

$$i_{pqr} = \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (u_{up} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{up} \\ (u_{uq} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{uq} \\ (u_{ur} \cdot i_{\alpha\beta 0}) u_{ur} \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

On remplace les équations (4.24) ; (4.26) & (4.29), dans l'équation (4.31) on trouve :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_r \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta & V_0 \\ -V_{\alpha\beta 0} V_\beta & V_{\alpha\beta 0} V_\alpha & 0 \\ V_{\alpha\beta} & V_{\alpha\beta} & \\ -V_0 V_\alpha & -V_0 V_\beta & \\ V_{\alpha\beta} & V_{\alpha\beta} & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Pour le passage inverse de repère (pqr) vers ( $\alpha\beta 0$ ) il sera de la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \\ \dot{i}_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_{\alpha\beta 0} V_\beta & -V_0 V_\alpha \\ V_\beta & V_{\alpha\beta 0} V_\alpha & -V_0 V_\beta \\ V_0 & 0 & V_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_p \\ \dot{i}_q \\ \dot{i}_r \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Pour les projections du vecteur tension sur les vecteurs unitaires sont obtenues de la même façon :

$$\mathbf{v}_{pqr} = \begin{bmatrix} v_p \\ v_q \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mathbf{u}_{up} \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{up} \\ (\mathbf{u}_{uq} \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{uq} \\ (\mathbf{u}_{ur} \cdot \mathbf{v}_{\alpha\beta 0}) \mathbf{u}_{ur} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

donc:

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_q \\ v_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha\beta 0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ v_0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Les puissances active et réactive dans le référentiel (pqr) sont définies respectivement par :

$$p = \mathbf{v}_p \cdot \dot{\mathbf{i}}_p = v_p \dot{i}_p \quad (4.36)$$

Et

$$\mathbf{q}_{pqr} = \mathbf{v}_{pqr} \times \dot{\mathbf{i}}_{pqr} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_p \dot{i}_r \\ v_p \dot{i}_q \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} = v_p \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Avec :  $q_q$  la puissance réactive sur l'axe q,  $q_r$  la puissance réactive sur l'axe r.

On peut aussi exprimer les courants en fonction des puissances comme suite :

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_p} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_r \\ q_q \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

#### IV.2.2.4- Théorie proposée

Le schéma de principe de la stratégie de contrôle proposée est illustré dans la Figure 4.8 :

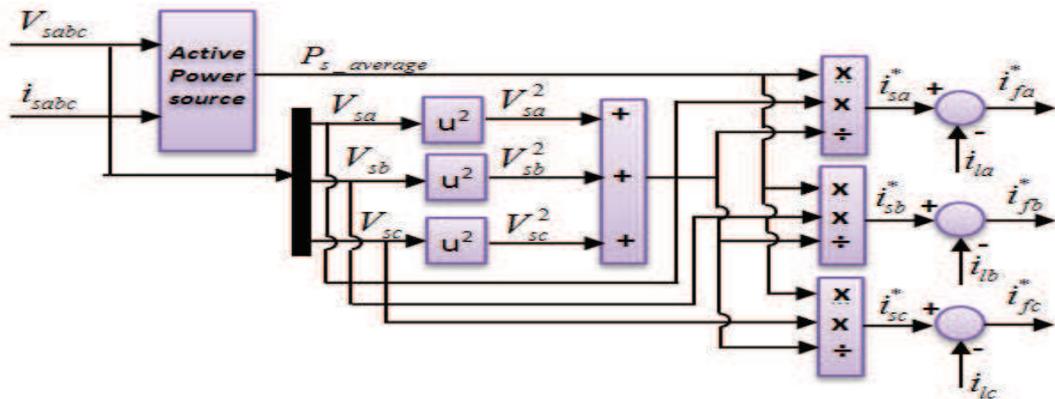


Fig.4.8- Schéma de la stratégie de contrôle proposée [58]

Cette technique a l'avantage d'être simple et facile d'implémentation, la stratégie proposée ne nécessite pas de transformations de coordonnées ou de calculs compliqués.

Tout d'abord, la soustraction des courants de charge ( $i_{la}$ ,  $i_{lb}$  et  $i_{lc}$ ) à partir du modèle de courant de référence ( $i_{sa}^*$ ,  $i_{sb}^*$  et  $i_{sc}^*$ ), par conséquent, on obtient le courant de référence instantané du filtre active ( $i_{fa}^*$ ,  $i_{fb}^*$  et  $i_{fc}^*$ ).

D'autre part, la soustraction ( $i_{fa}^*$ ,  $i_{fb}^*$  et  $i_{fc}^*$ ) à partir du courant d'harmonique (courant généré par le filtre actif parallèle), par conséquent, les impulsions de commutation pour la source de l'onduleur de tension sont obtenus.

Les courants de référence sont obtenus à partir de la puissance instantanée et des tensions de source de courant alternatif. Les tensions instantanées de source de courant alternatif sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} V_{sa}(t) = V_{sm} \sin(\omega.t) \\ V_{sb}(t) = V_{sm} \sin(\omega.t - 2\pi / 3) \\ V_{sc}(t) = V_{sm} \sin(\omega.t - 4\pi / 3) \end{cases} \quad (4.40)$$

La puissance instantanée de la source (à échantillon  $K^{\text{th}}$ ) est écrit tel que présenté ci-dessous :

$$P_{savg}(t) = V_{sa}(t)i_{sa}(t) + V_{sb}(t)i_{sb}(t) + V_{sc}(t)i_{sc}(t) \quad (4.41)$$

Le courant de source requis est donné par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{sa}^* \\ i_{sb}^* \\ i_{sc}^* \end{bmatrix} = \frac{P_{savg}}{V_{sa}^2 + V_{sb}^2 + V_{sc}^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

Les courants de référence (courant d'harmonique) du filtre actif parallèle sont obtenus par la soustraction du courant de charge à partir du courant de source de référence, comme dans l'équation ci-dessous :

$$\begin{cases} i_{fa}^* = i_{sa}^* - i_{la} \\ i_{fb}^* = i_{sb}^* - i_{lb} \\ i_{fc}^* = i_{sc}^* - i_{lc} \end{cases} \quad (4.43)$$

### IV.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la présentation des différentes stratégies de détection des harmoniques basées respectivement sur la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie de référentiel synchrone (dq) et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel (pqr) et finalement la théorie proposée. Comme cette dernière constitue l'un des mots clés de cette thèse en plus du filtrage actif et des onduleurs multiniveaux, on a passé un temps assez conséquent pour exposer sa théorie.

Dans le chapitre suivant nous essayons d'étudier le filtre actif parallèle à base des onduleurs de tension trois niveaux, pour but d'améliorer les formes d'ondes de la tension et de courant, afin de minimiser le contenu en harmoniques, et on va présenter quelques applications de filtre actif simulé sous Matlab-Simulink, des analyses commentées ainsi que des études comparatives y seront exposées.

# Chapitre V

## ETUDES COMPARATIVES ENTRE LES METHODES DE COMMANDE

## V.1- INTRODUCTION

Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant [76]. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et le fondamental réactif [77,78]. Il s'insère entre le réseau et la charge non linéaire. Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie du type de modulation mis en œuvre pour la commande des interrupteurs, du dimensionnement des éléments de couplage au réseau et du système de stockage (généralement capacitif), de la dynamique des algorithmes d'extraction et de contrôle des courants [79,50].

Les objectifs de ce chapitre sont de comprendre la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général. Nous examinerons le rôle des multiples éléments le composant et aussi, nous nous ferons présenter ces principaux types de commande, une comparaison entre deux types d'algorithmes de commande est élaborée. Ces algorithmes de commande sont : la méthode des puissances instantanées, la stratégie de commande proposée. Cette comparaison est effectuée à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink/SimPowerSystems.

## V.2- LA PARTIE PUISSANCE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE A STRUCTURE TENSION

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure 5.1 On y distingue trois éléments :

- un onduleur de tension.
- un filtre de découplage.
- un élément de stockage capacitif.

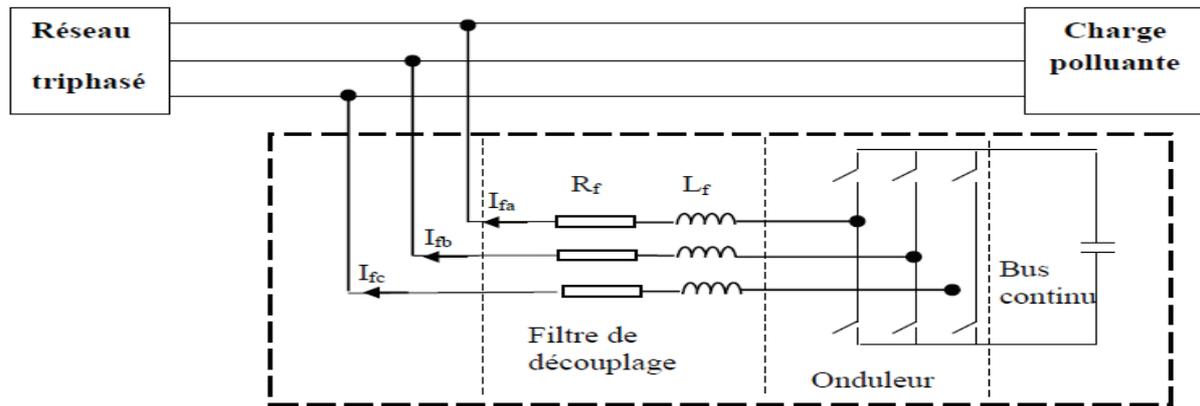


Fig.5.1- Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

La figure 5.2 présente le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage ( $L_f$ ,  $R_f$ ). La capacité  $C$  se comporte comme une source de tension continue. La tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

### V.2. 1- L'onduleur de tension

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mets-en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.

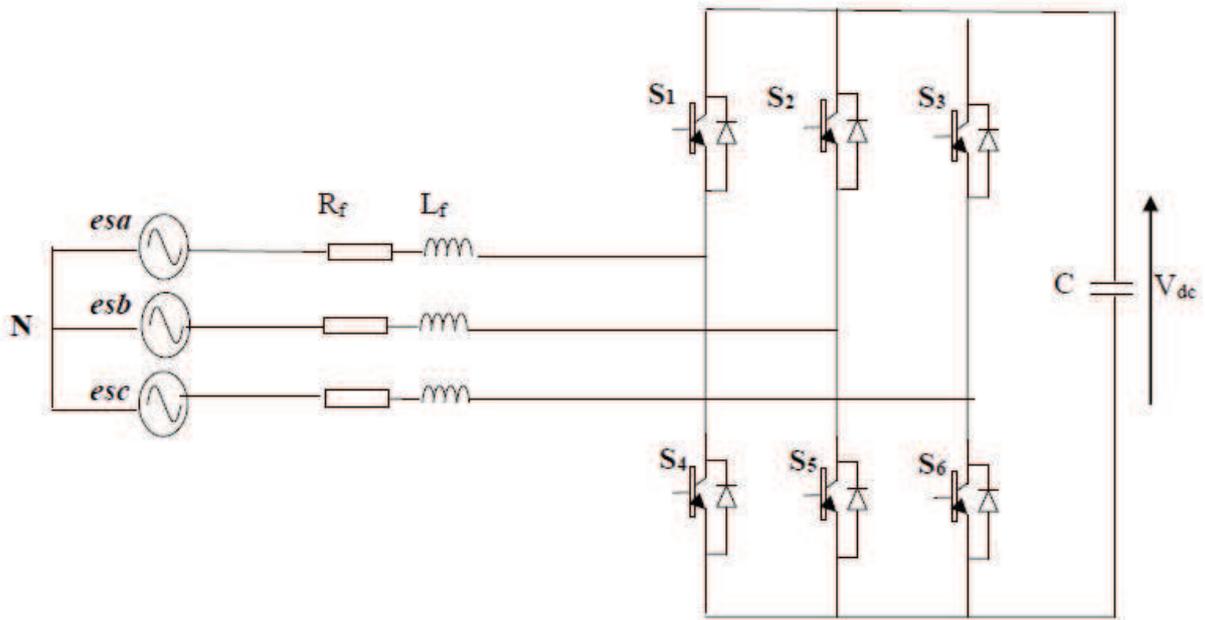


Fig.5.2- Filtre actif à structure tension

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure 5.2 dépendent de l'état de trois signaux de commande ( $T_1, T_2, T_3$ ), définis ci-dessous :

$$T_1 = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermé et } S_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_4 \text{ fermé et } S_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ fermé et } S_5 \text{ ouvert} \\ 0 & S_5 \text{ fermé et } S_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_3 = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ fermé et } S_6 \text{ ouvert} \\ 0 & S_6 \text{ fermé et } S_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des

interrupteurs présentés par les variables  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$ , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif  $V_{fi}$  (référéncées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau 5.1.

TAB.5.1-Tensions en sortie de l'onduleur.

$V_{fa}$	$V_{fb}$	$V_{fc}$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	Cas $N^\circ$
0	0	0	0	0	0	0
$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	1	0	0	1
$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	0	1	0	2
$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	1	1	0	3
$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	0	0	1	4
$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	1	0	1	5
$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	0	1	1	6
0	0	0	1	1	1	7

### V.2.2- Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [80]. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la figure 5.2. Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre.

### V.2.3- Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$  [81]. Le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$

élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de  $C_{dc}$ , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Le condensateur du côté continu a deux fonctionnalités principales :

Maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent, être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance active absorbée par la charge plus une faible puissance active qui sert à compenser les pertes dans le filtre. La tension de la cote continue peut être maintenue à une valeur de référence désirée.

Néanmoins, quand les conditions de charge changent, la puissance transitant entre la source et la charge est perturbée et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du côté continu ce qui éloigne cette tension de sa référence. Pour satisfaire les fonctionnalités du filtre actif, la valeur maximale du courant de référence doit être ajustée proportionnellement à l'énergie fournie par la source. Si la tension aux bornes du condensateur a été régulée et a atteint sa tension de référence, l'énergie fournie par la source est supposée être égale à l'énergie consommée par la charge. La valeur maximale du courant de référence est obtenue par régulation de la tension cotée continue.

### **V.3- CONTROLE DES COURANTS DU FILTRE ACTIF (PARTIE COMMANDE)**

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant).

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

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

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence.

### V.3.1- Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La technique de commande par MLI : *la commande par modulation de largeur d'impulsion* résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur [49].

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure 5.3.

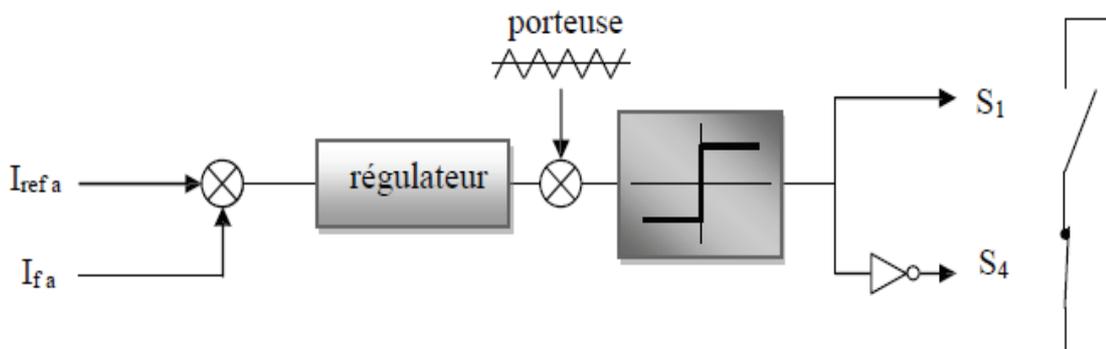


Fig.5.3- Principe de commande par MLI

### V.3.2- Commande par hystérésis

La commande par hystérésis appelée tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal [82].

Chaque sortie de ce gabarit entraîne un changement de configuration des interrupteurs Figure 5.5. Ce système de contrôle est caractérisé par une fréquence de commutation variable. La mise en œuvre de cette stratégie de contrôle est relativement simple [39, 47].

Le choix de la bande d'hystérésis doit tenir compte d'un certain nombre de condition liées au fonctionnement de l'onduleur, parmi lesquelles la fréquence de commutation admissible pour les composants semi-conducteurs [83, 84].

Dans notre travail on va utiliser ce type de commande car les performances de compensation par la commande hystérésis sont meilleures, en dynamique et en statique [85].

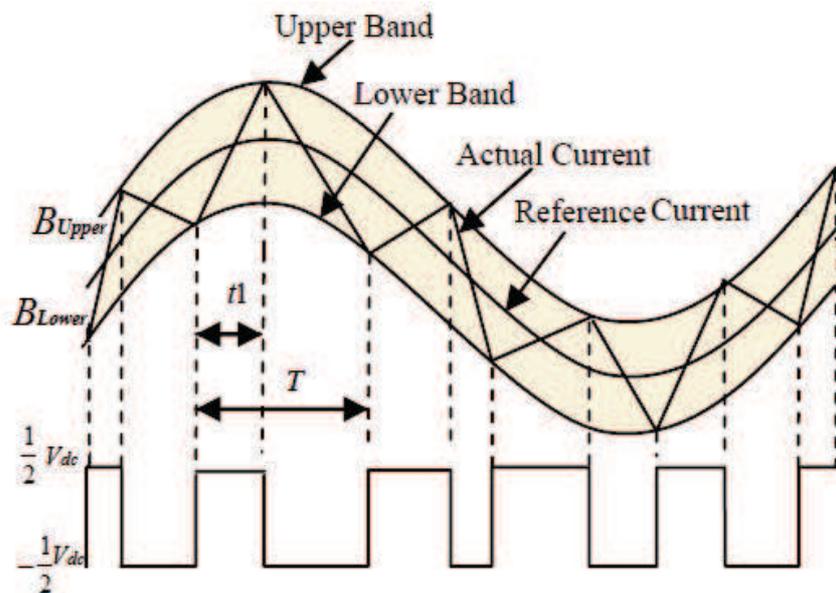


Fig.5.4- Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur [58]

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure 5.5 :

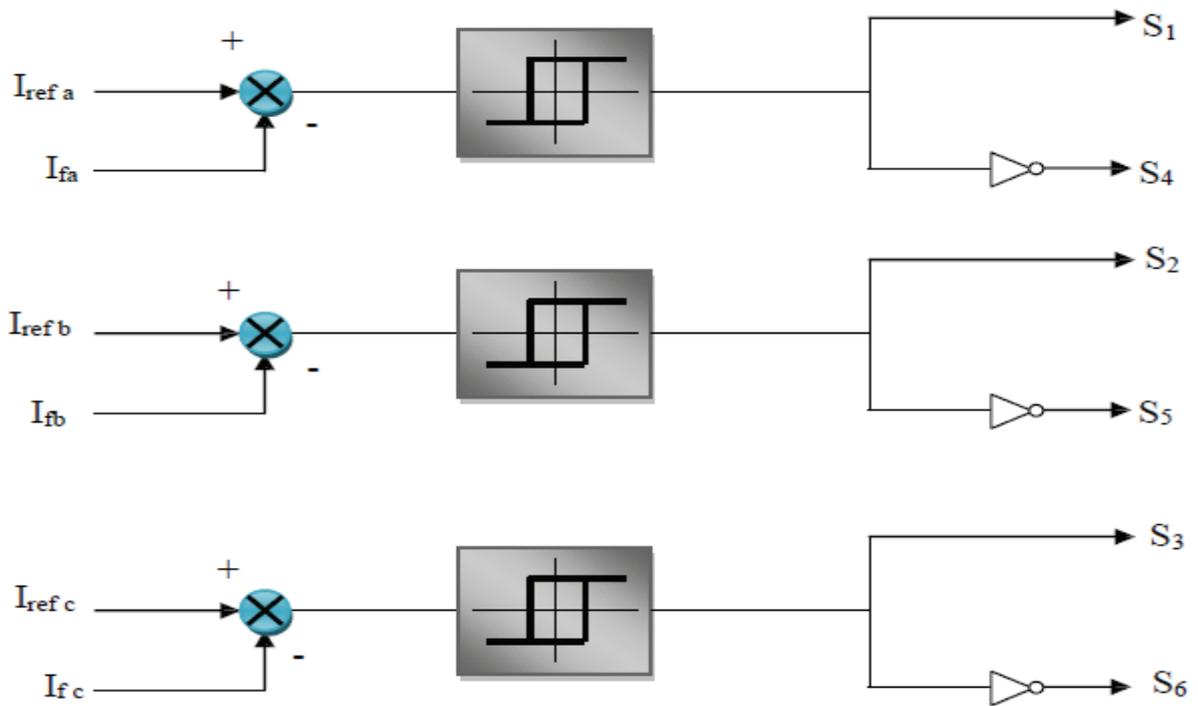


Fig.5.5- Principe de la commande du courant par hystérésis.

La Figure 5.6 représente le modèle simplifié d'un contrôleur de bande d'hystérésis.

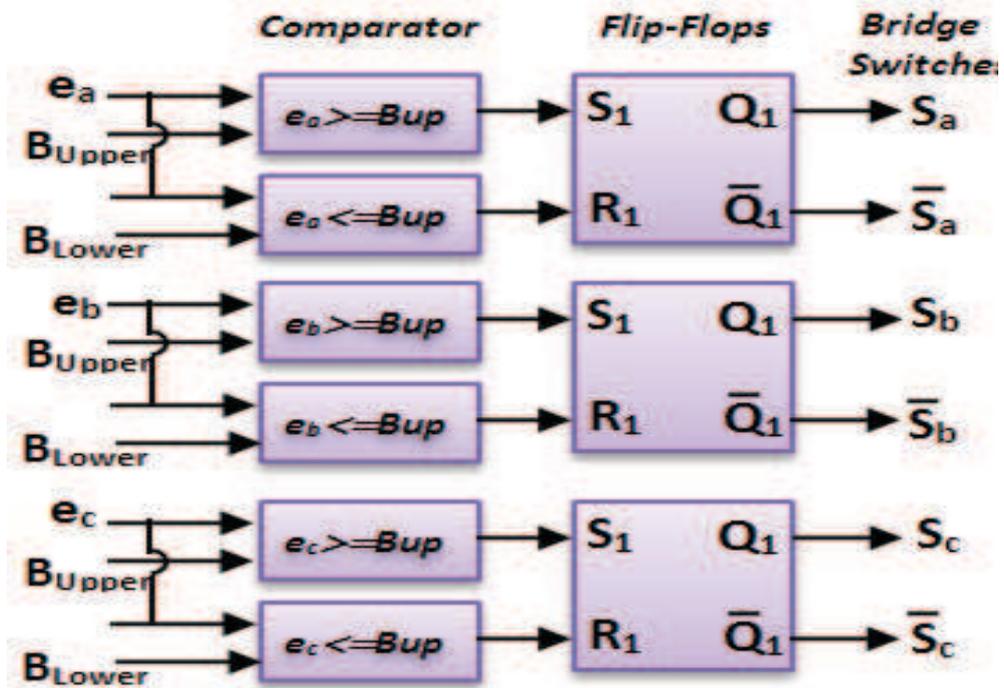


Fig.5.6-Modèle simplifié d'un contrôleur de bande d'hystérésis [58].

## V.4- RESULTATS DE SIMULATION

Les modèles et l'ensemble des simulations sont réalisés dans l'environnement Matlab/Simulink. L'objectif est de valider et de montrer l'efficacité de l'utilisation de la théorie proposée pour l'identification et la commande dans le filtrage actif parallèle appliquée à une charge non linéaire équilibré et déséquilibré.

La charge polluante est constituée par un pont redresseur triphasé à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.é.m. sinusoïdale en série avec une inductance ( $L_s$ ) et une résistance ( $R_s$ ) caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau, voir Figures 5.7. Le redresseur débite dans une charge (RLC). L'inductance et la résistance à l'entrée du redresseur modélisent l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations de courant. Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension, Pour la commande de l'onduleur du filtre actif shunt à base du MOSFET, nous avons utilisé la commande par hystérésis.

Les paramètres de simulation sont rassemblés dans le Tableau 5.2.

TAB.5.2- Paramètres du système

<b>Réseau d'alimentation</b>				
<b>Paramètre</b>	$V_s$ (V)	F(Hz)	$R_s$ ( $\Omega$ )	$L_s$ (mH)
<b>Valeurs</b>	380	50	0.001	0.25
<b>Charge non-linéaire</b>				
<b>Paramètre</b>	R ( $\Omega$ )		L (mH)	C(F)
<b>Valeurs</b>	150		100	0.01
<b>Charge déséquilibrée</b>				
	R ( $\Omega$ )		L (mH)	C(F)
<b>Charge 1</b>	150		100	0
<b>Charge 2</b>	80		200	0
<b>Charge 3</b>	100		50	0
<b>Filtre actif shunt</b>				
<b>Paramètre</b>	$L_f$ (mH)		$R_f$ ( $\Omega$ )	$V_{dc}$ (V)
<b>Valeurs</b>	35		3.5	650



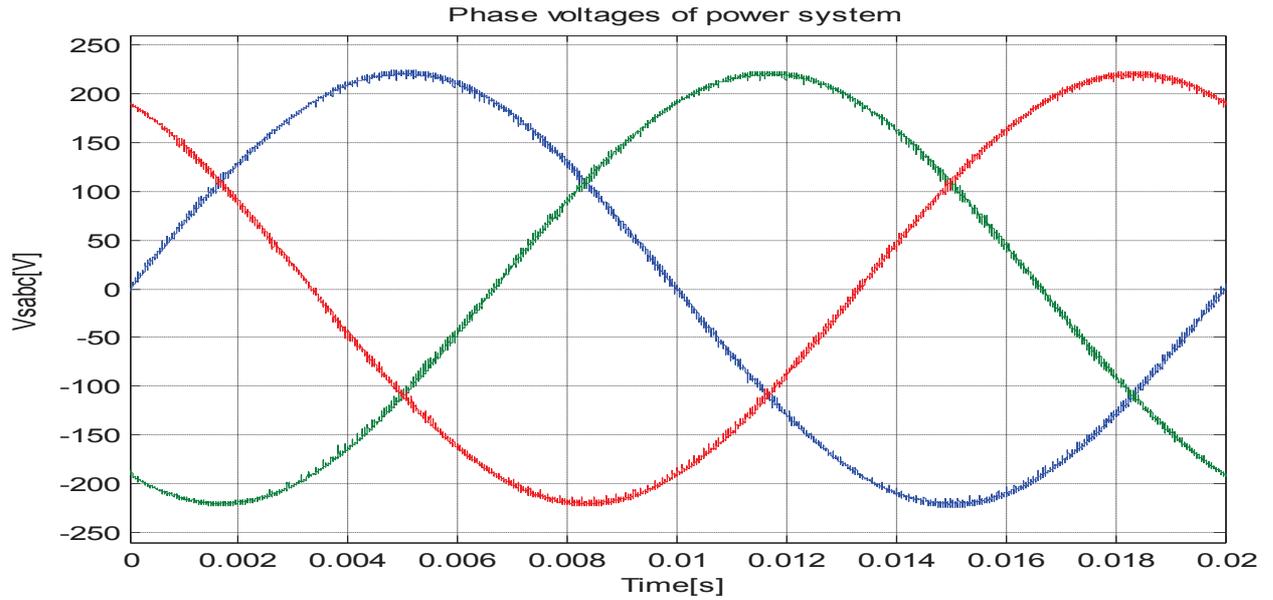


Fig.5.9- Zoom des tensions de la source

Les Figures (5.10 et 5.11) montrent respectivement le courant et leur zoom de la source avant l’insertion du filtre actif.

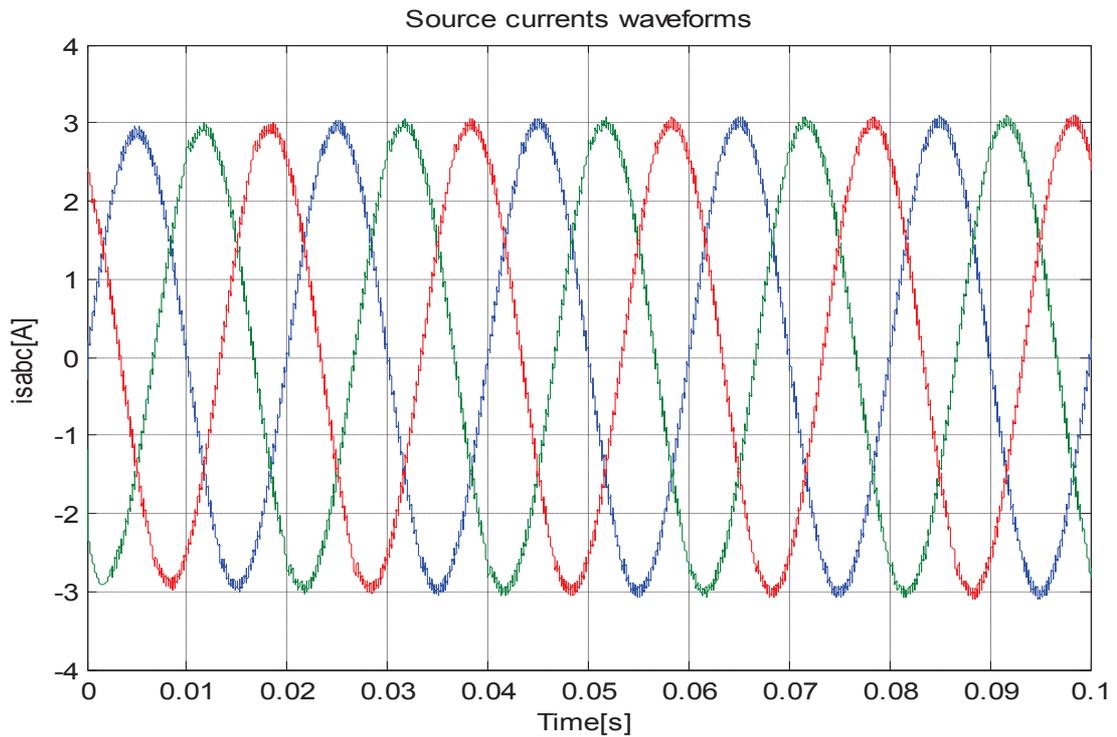


Fig.5.10- Les courants de la source avant l’insertion du filtre actif.

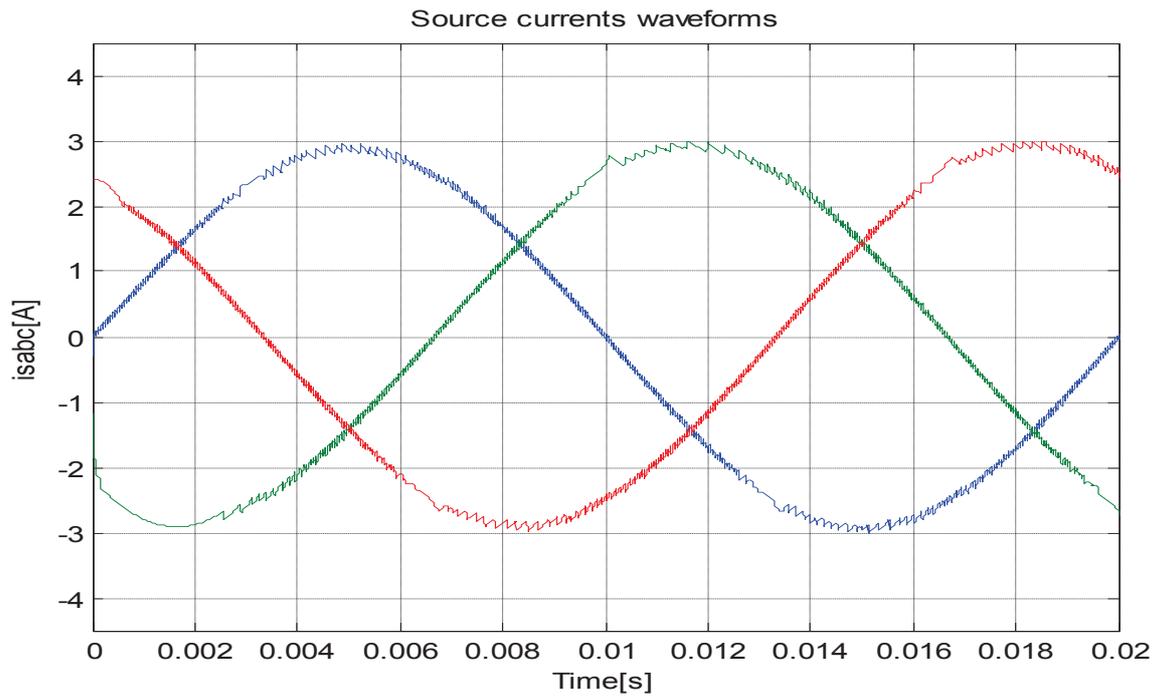


Fig.5.11- Zoom des courants de la source avant l’insertion du filtre actif

Les Figures (5.12, 5.13 et 5.14) montrent respectivement les courants de la charge non linéaire, la charge déséquilibrée et la charge totale avant l’insertion du filtre actif.

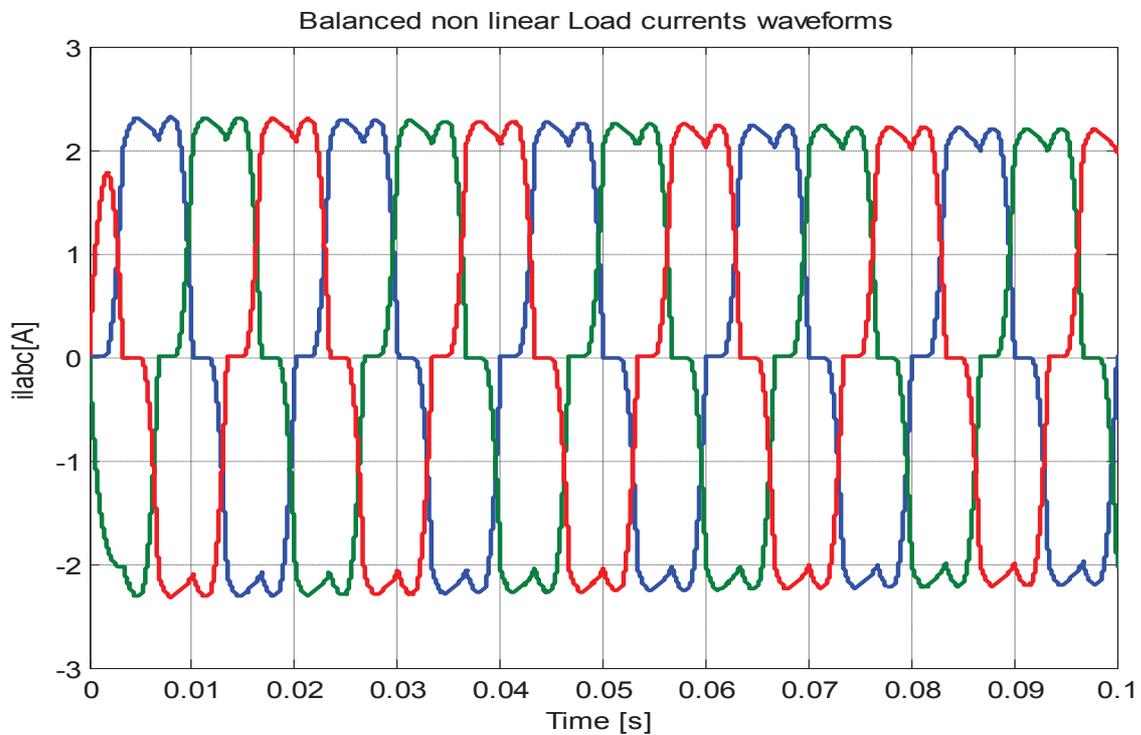


Fig.5.12- Les courants de la charge non linéaire avant l’insertion du filtre actif

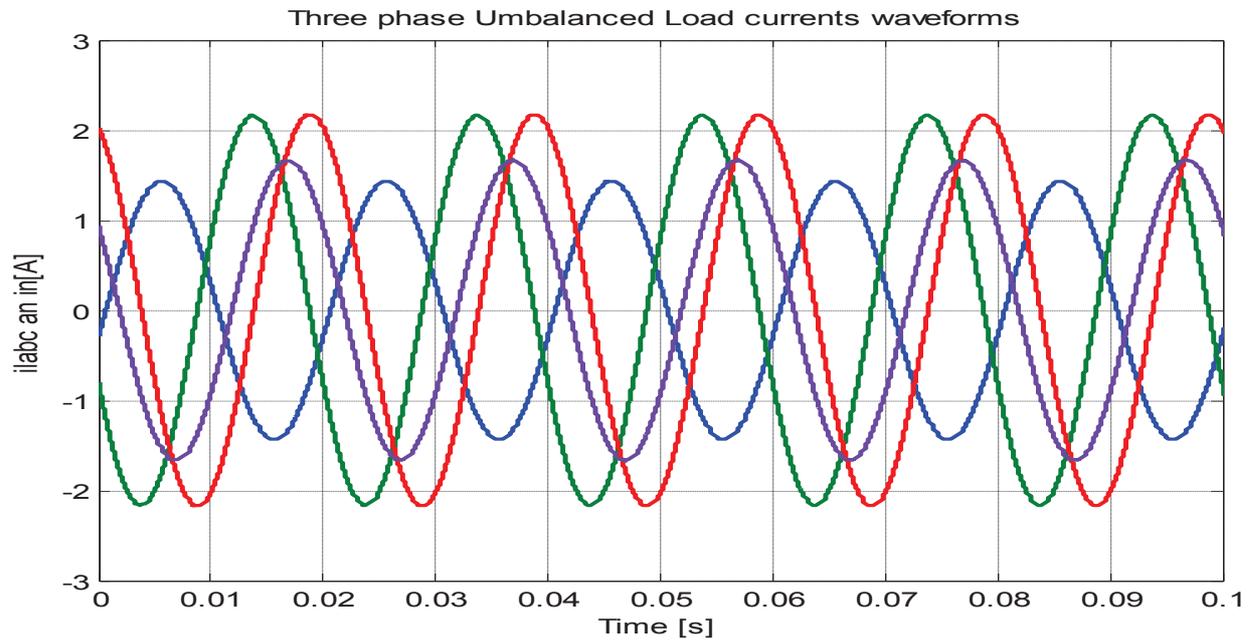


Fig.5.13- Les courants de la charge déséquilibrée avec le neutre avant l’insertion du filtre actif

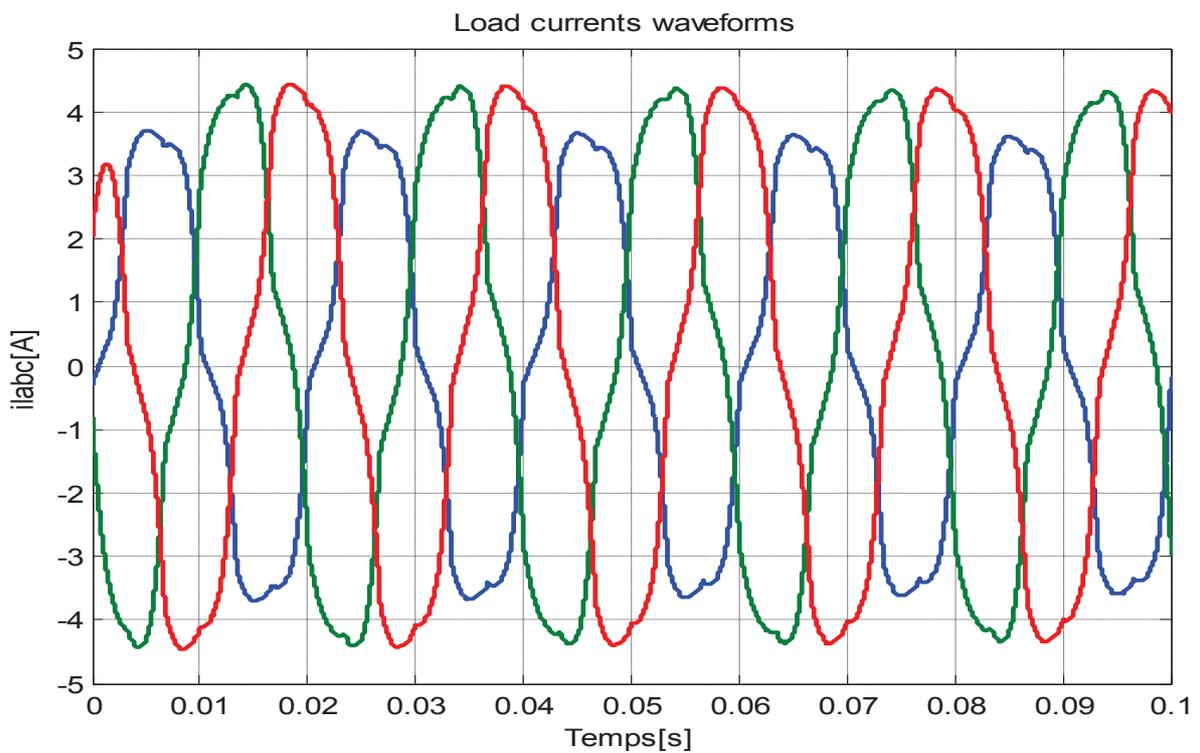


Fig.5.14- Les courants de la charge totale avant l’insertion du filtre actif

On remarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui provoque la pollution du réseau étudié ; En effet, on constate des déformations dans l'onde du courant de source qui perd sa forme sinusoïdale.

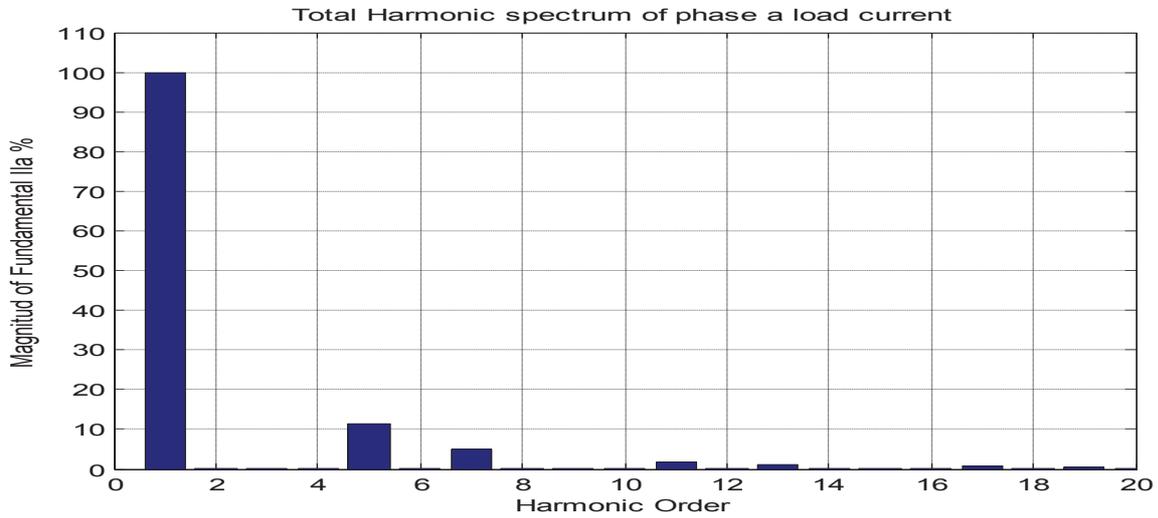


Fig.5.15- Spectre harmonique de courant de la charge phase-*a*- avant filtrage

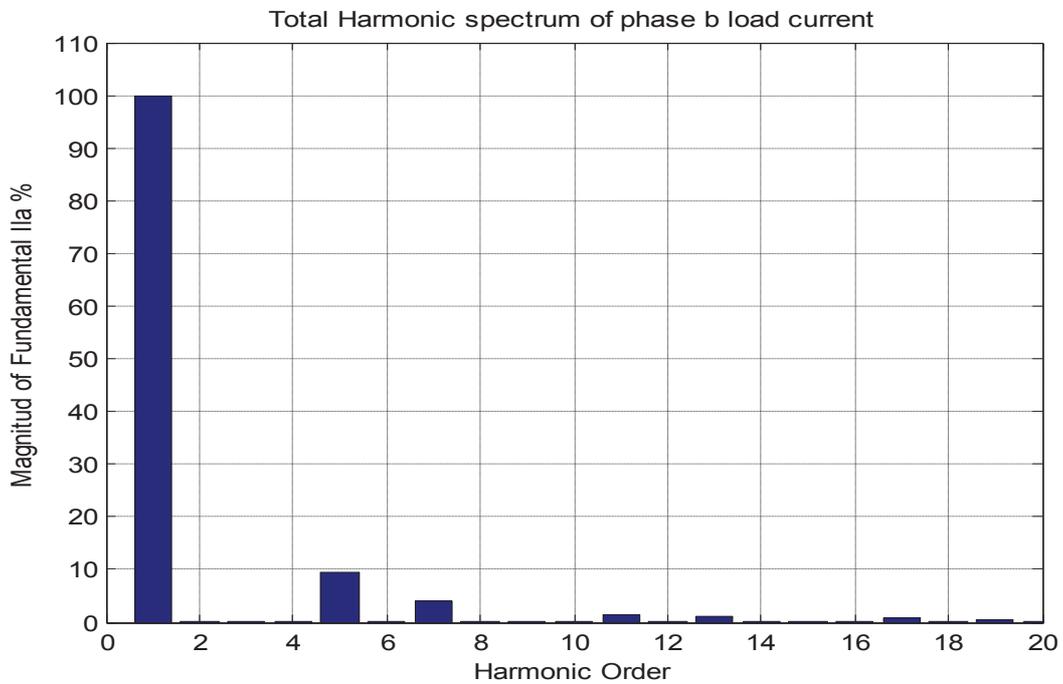


Fig.5.16- Spectre harmonique de courant de la charge phase-*b*- avant filtrage

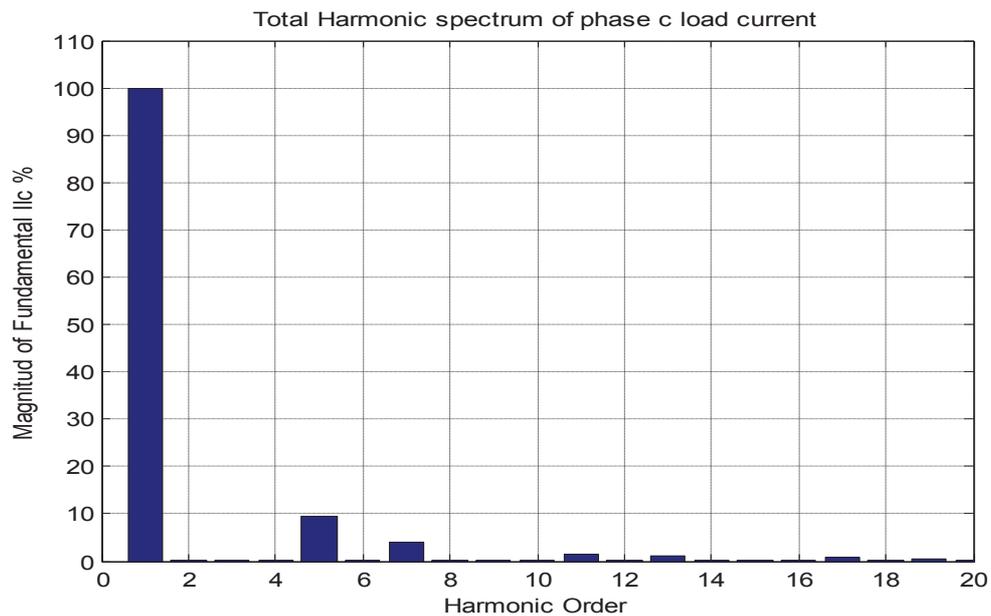


Fig.5.17- Spectre harmonique de courant de la charge phase-*c*- avant filtrage

L’analyse spectrale du courant absorbé par la charge est représentée dans les Figures (5.15, 5.16 et 5.17) ces dernies montre la présence, en plus de la fondamentale (rang 1), des harmoniques de rang. 5, 7, 11, 13, 17 et 19 ...etc. Le taux de distorsion (THD) dans les phases (*a*, *b* et *c*) est de **12.55%**, **10.58%** et **10.53%** respectivement, ces valeurs sont bien au-dessus de la norme IEEE519.

#### V.4.1- Résultat de Simulation du FAP

Dans cette partie on va présenter les résultats de simulation du filtre actif parallèle à base d’un onduleur de tension trois niveaux, avec une étude comparative entre les deux méthodes d’identification des harmoniques à savoir : la méthode des puissances instantanées (*pq*) et le schéma de contrôle proposé

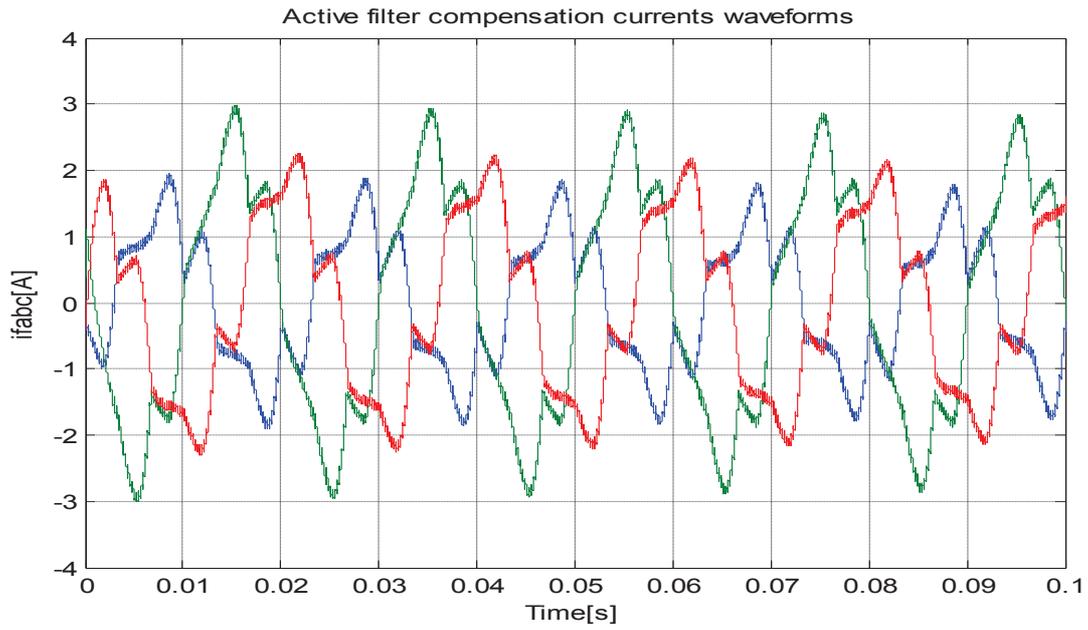
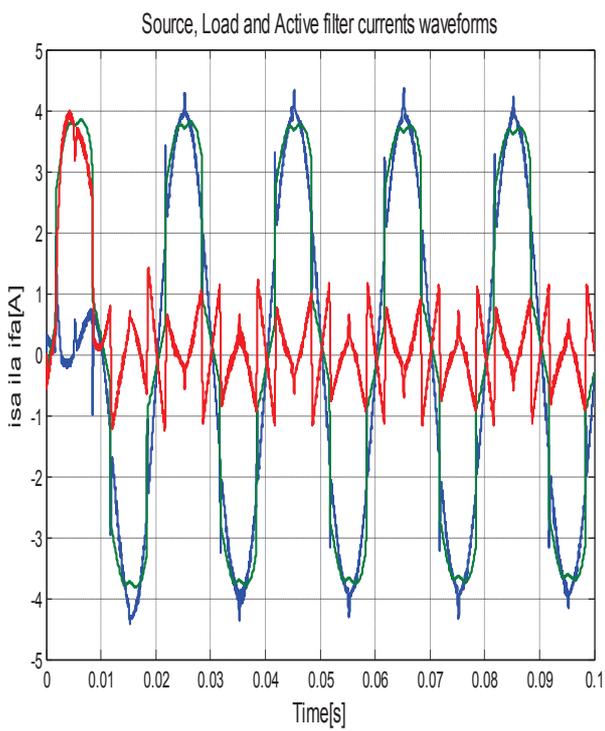
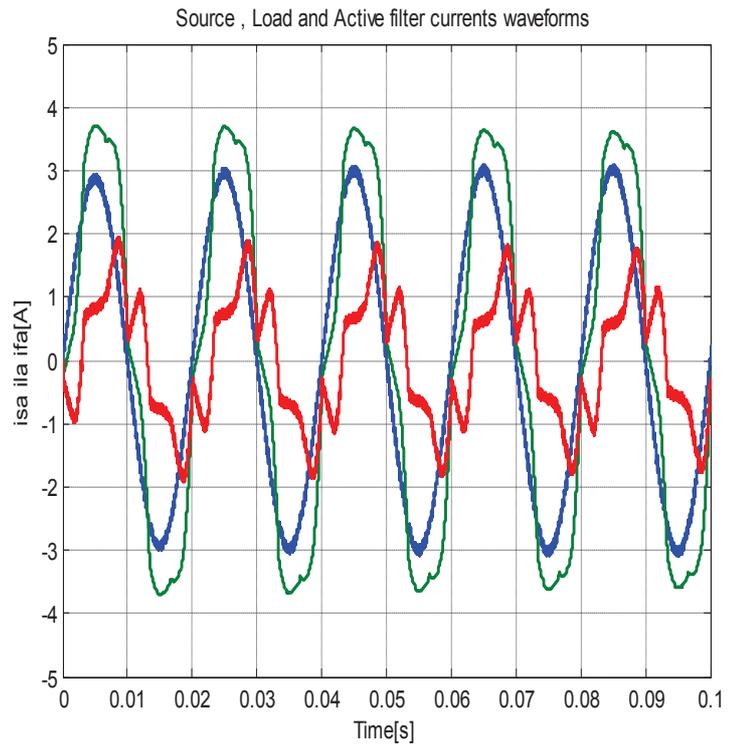


Fig.5.18- Courant du filtre actif parallèle commandé par la théorie proposée

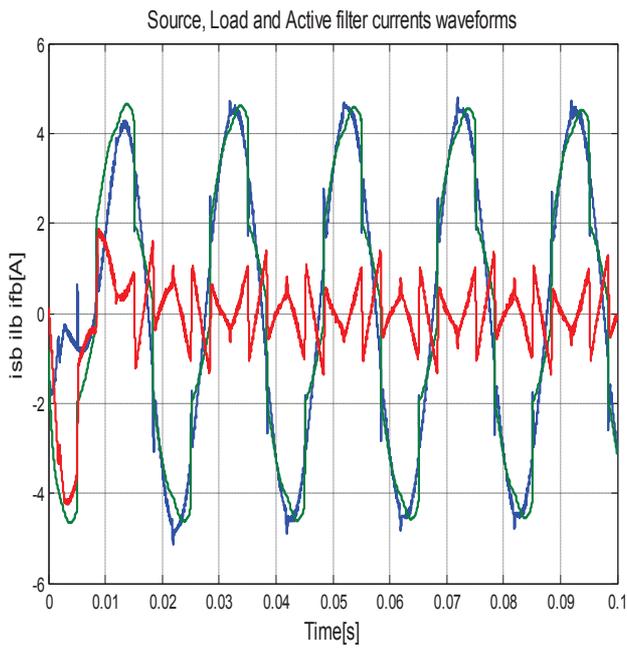


(a) Avec la méthode conventionnelle *pq*

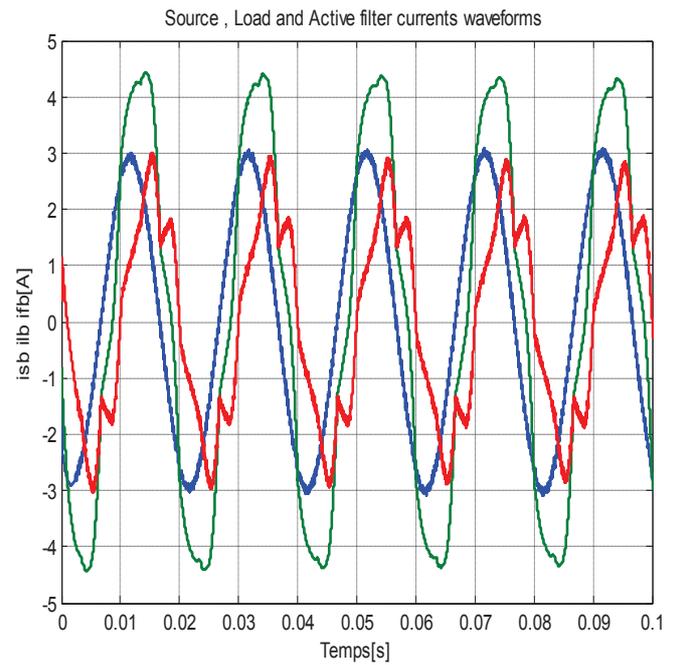


(b) Avec le schéma de contrôle proposé

Fig.5.19- Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle de la phase -a

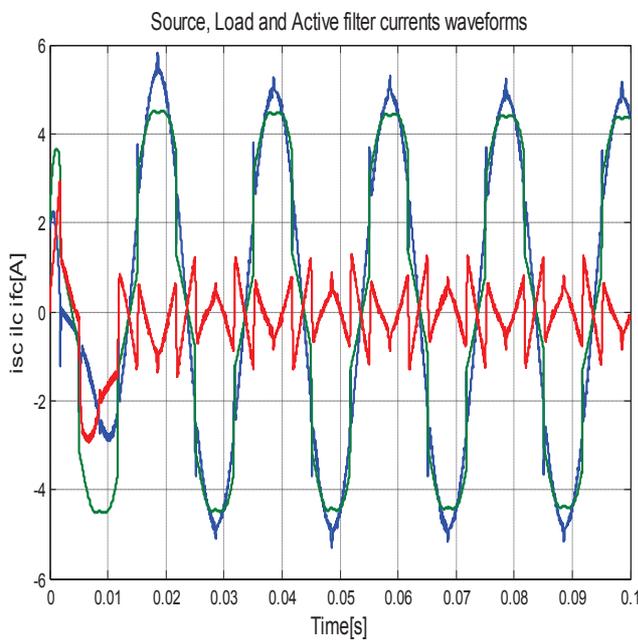


(a) Avec la méthode conventionnelle  $pq$

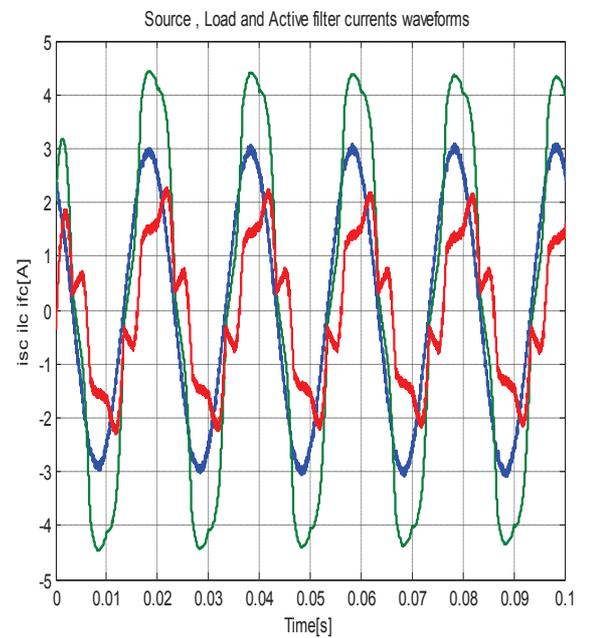


(b) Avec le schéma de contrôle proposé

Fig.5.20- Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle de la phase  $-b$



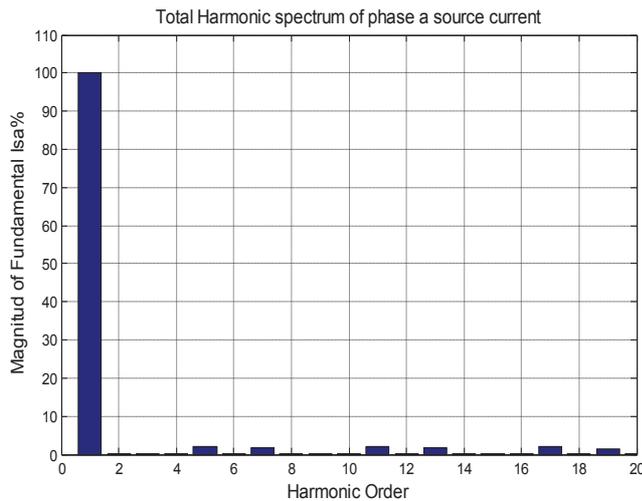
(a) Avec la méthode conventionnelle  $pq$



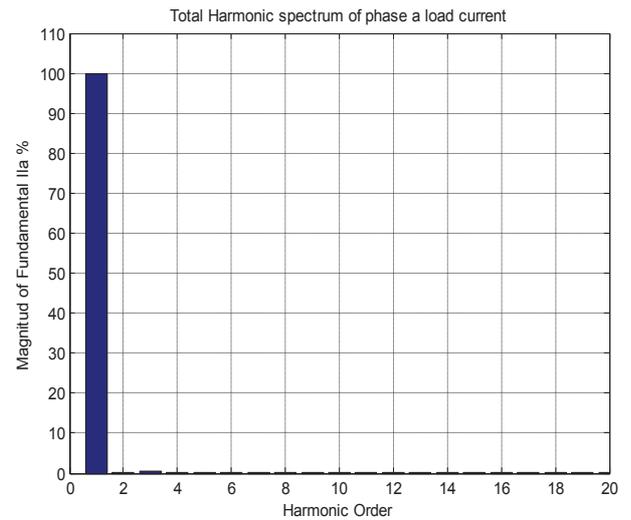
(b) Avec le schéma de contrôle proposé

Fig.5.21- Formes d'onde des courants de la source, de la charge et du filtre actif parallèle de la phase  $-c$

Après l'injection du courant de référence reproduit par le filtre actif dans le réseau, on peut constater qu'une fois le filtre actif parallèle est mis en marche, le courant du réseau y est désormais sinusoïdal et exempt de toutes perturbations harmoniques avec le schéma de contrôle proposé pour les trois phases par contre avec la méthode conventionnelle *pq* est toujours pas satisfaisante. Le fait que le courant de source à récupérer son allure sinusoïdale, ce qui traduit que si notre onduleur puisse injecter un courant qui suit sa référence, on aura un courant de source sinusoïdale avec la théorie proposée.

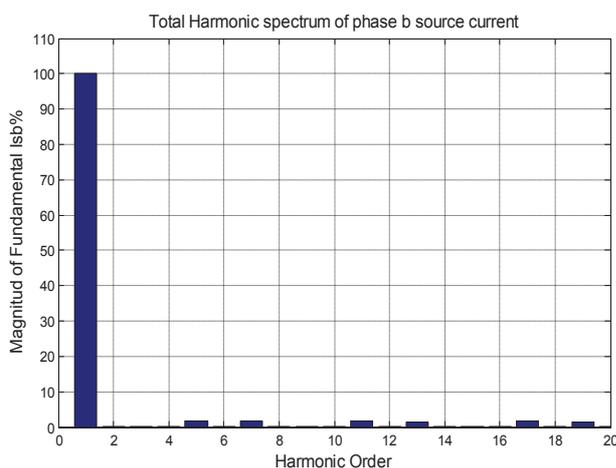


(a) Avec la méthode conventionnelle *pq*

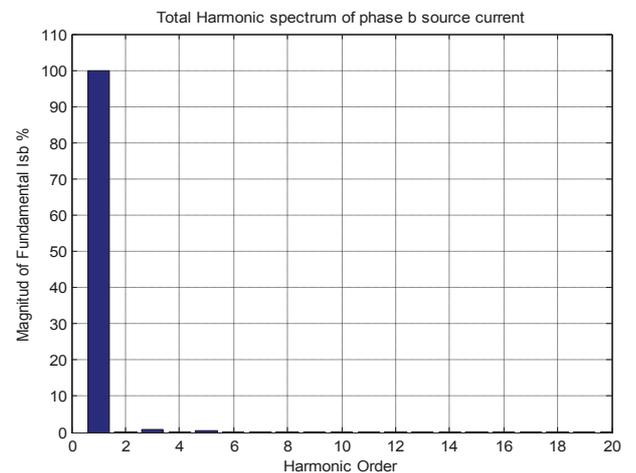


(b) Avec le schéma de contrôle proposé

Fig.5.22-Spectre harmonique de courant de la source phase-*a*- avec filtrage

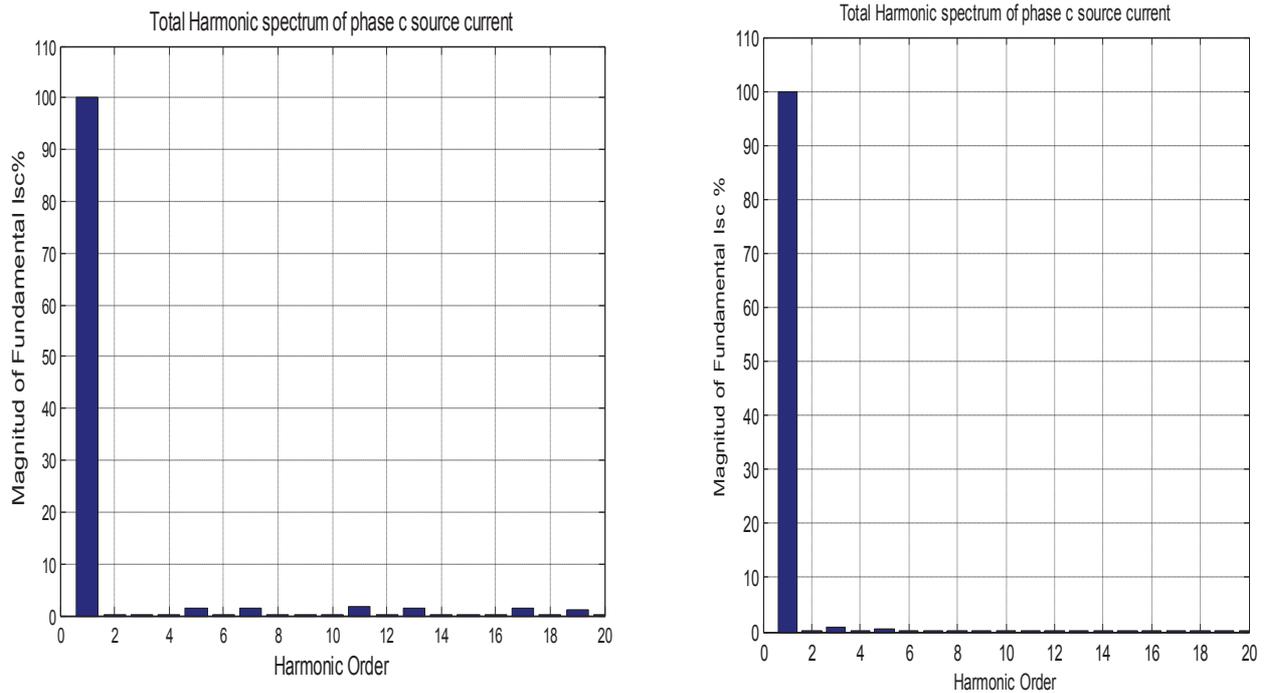


(a) Avec la méthode conventionnelle *pq*



(b) Avec le schéma de contrôle proposé

Fig.5.23-Spectre harmonique de courant de la source phase-*b*- avec filtrage



(a) Avec la méthode conventionnelle *pq* (b) Avec le schéma de contrôle proposé

Fig.5.24-Spectre harmonique de courant de la source phase-*c*- avec filtrage

Les Figures (5.22, 5.23 et 5.24) présentent l’analyse spectrale de courant de source effectuée sur les trois phases. Cette représentation spectrale confirme le non présence des harmoniques, ces dernières sont compensées. Le THD qui était à 12.55%, 10.58% et 10.53%, pour les phases (*a*, *b* et *c*) respectivement est réduit après filtrage à un taux très faible de 1.69% de la phase *a*, 1.89% de la phase *b* et 1.85% de la phase *c* pour la théorie proposée, pour la théories *pq* 6.84%, 6.09% et 6.09% pour les phases (*a*, *b* et *c*) respectivement, ces valeurs sont bien au-dessus de la norme IEEE519, ce qui confirme la validité de la méthodes proposée.

Afin de mieux exploiter les résultats obtenus, on se propose de faire une comparaison entre les résultats de simulation du le filtre actif pour les deux méthodes de contrôle présentées auparavant comme il est représentée dans le tableau 5.3.

TAB.5.3- Les résultats comparatifs du THD

		Sans FAP	FAP avec la méthode <i>pq</i>	FAP avec la méthode proposée
THD	Phase <i>a</i>	12.55%	6.84%	1.69%
	Phase <i>b</i>	10.58%	6.09%	1.89%
	Phase <i>c</i>	10.53%	5.56%	1.85%

D’après les résultats qui figurent dans le tableau 5.3, on constate que le THD est dans les normes pour la méthode proposée, Cependant la méthode *pq* le THD dépasse la valeur limitée par les normes IEEE519.

## V.5- CONCLUSION

Dans ce travail, un filtre actif à base d’un onduleur de tension trois niveaux, est étudié avec différentes stratégies de détection des harmoniques basées respectivement sur la méthode des puissances instantanées (*pq*), la théorie proposée. Cette dernière donne directement la forme d’onde harmonique à compenser et ont une réponse adéquate pour le traçage des harmoniques variant dans le temps. Les résultats de simulations obtenus sur l’interface Simulink du logiciel Matlab, confirment l’efficacité de la méthode proposée. En outre, la stratégie de contrôle proposée est très simple et robuste.

**CONCLUSION**  
**GENERALE**

## **CONCLUSION GENERALE**

Les évolutions techniques et réglementaires qui ont eu lieu ces dernières années sur le réseau électrique ont donné lieu à des exigences chaque fois plus élevées pour les systèmes à base d'électronique de puissance. Mais le besoin croissant enduit automatiquement à une multiplication de ces équipements, qui à leurs tours provoquent la pollution du réseau électrique. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires, ces derniers à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

Une des solutions les plus efficaces pour corriger ces inconvénients est l'utilisation des filtres actifs parallèles ayant pour but, de dépolluer le réseau et de compenser l'énergie réactive. Ce qui nous permet d'avoir un courant du réseau presque sinusoïdal avec un facteur de puissance unitaire.

Le travail présenté dans cette thèse apporte une synthèse des filtres actifs de puissance, principaux palliatifs aux problèmes engendrés par la pollution harmonique dans les réseaux de distribution. Notre contribution majeure dans ce domaine consiste au développement d'une théorie d'un filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension deux niveaux commandés par hystérésis.

Nous avons pris en étude comme problématique les perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques.

Néanmoins, L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés ainsi que la présentation des normes en vigueur. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objets de ce manuscrit.

Nous avons aussi exposé des solutions traditionnelles et modernes de dépollution qui ont été élaboré. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Récemment, en plus du filtrage des harmoniques, les filtres actifs parallèles et séries et leur combinaison, sont étudiés pour la compensation de tous les types de perturbation

susceptible d'apparaître dans un réseau électrique BT. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Cependant, nous avons abordé en premier lieu les différentes techniques d'identifications des courants harmoniques dans le domaine fréquentiel appliqué au filtre actif shunt triphasé à structure en tension. Par la suite nous avons étudié les techniques d'identification dans le domaine temporel largement utilisées au filtrage des harmoniques, on parle de la méthode des puissances instantanées, la théorie de référentiel synchrone et la théorie des puissances instantanées dans le référentiel et finalement la théorie proposée. Cette approche nous a permis de réduire considérablement la complexité de l'algorithme de commande

Enfin, un filtre actif à base d'un onduleur de tension deux niveaux, a été étudié avec différentes stratégies de détection des harmoniques basées respectivement sur la méthode des puissances instantanées (pq), la théorie proposée. Cette dernière donne directement la forme d'onde harmonique à compenser et ont une réponse adéquate pour le traçage des harmoniques variant dans le temps. Les résultats de simulations obtenus sur l'interface Simulink du logiciel Matlab, confirment l'efficacité de la méthode proposée. De plus, nous avons montré que cette nouvelle commande dite « schéma de contrôle proposé » permet également d'améliorer les performances de filtrage et les caractéristiques de compensation du filtre. Cela est justifié par les faibles valeurs du THD obtenu pour les courants de source. En outre, la stratégie de contrôle proposée est très simple et robuste.

## **PERSPECTIVES**

Le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique est riche en interrogations et en perspectives, qui feront l'objet de nos futures travaux. Comme perspectives, on est en cours d'améliorer d'abord nos résultats surtout ceux liés au filtre actif parallèle trois niveaux commandé par hystérésis, et à préparer une maquette expérimentale avec carte DSP.

Nous pouvons également envisager d'approfondir nos travaux sur l'utilisation de circuits intégrés mettant en œuvre la technologie FPGA afin de répondre aux contraintes de calcul temps réel. Cette technologie possède plusieurs avantages tels qu'un faible coût, une grande vitesse de calcul et la possibilité d'atteindre un temps d'échantillonnage très court.

Aussi, on est en train de travailler sur les combinaisons parallèles-séries (*unified power quality conditioner UPQC*), vu les nombreux avantages qu'elles offrent, notamment le filtrage des harmoniques de courant et de tension, la compensation des creux de tension, l'élimination des déséquilibres, ...etc.

En outre, avec le nouvel intérêt aux génératrices à reluctance variable GRV, on pense à remplacer la génératrice asynchrone double alimentation GADA par une GRV afin d'arriver au modèle le plus avantageux. En plus, comme les nouvelles techniques d'identification des grandeurs harmoniques ne cessent d'apparaître, on songe à établir une synthèse afin d'adopter celle qui s'approche le plus des ondes idéales.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

- [1]. DUFFEY, Christopher K. et STRATFORD, Ray P. Update of harmonic standard IEEE-519: IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1989, vol. 25, no 6, p. 1025-1034.
- [2]. BERMEO, Amaia Lopez De Heredia. *Commandes avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la montée en tension*. 2006. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [3]. NDJAKOMO, Essiane Salomé, PERABI, Ngoffe Stève, MOUKENGUE, Imano Adolphe, *et al.* Présentation et application d'un nouveau schéma de contrôle d'un filtre hybride parallèle à des réseaux électriques triphasés 400V/50Hz et 480V/60Hz. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 2014, vol. 10, no 2.
- [4]. SASAKI, H. et MACHIDA, T. A new method to eliminate ac harmonic currents by magnetic flux compensation-considerations on basic design. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1971, no 5, p. 2009-2019.
- [5]. ARORA, N. *MOSFET Models for VLSI Circuit Simulation—Theory and Practice. Computational Microelectronics*. Springer-Verlag, Wien New York, 1993.
- [6]. LASKA, T., MÜNZER, M., PFIRSCH, F., *et al.* The field stop IGBT (FS IGBT)-a new power device concept with a great improvement potential. In : *ISPO'2000: international symposium on power semiconductor devices and IC's*. 2000. p. 355-358.
- [7]. PAPPENFUSS, Jeffrey R. et WICKERT, M. A. Implementation of a real-time, frequency selective, RF channel simulator using a hybrid DSP-FPGA architecture. In : *Radio and Wireless Conference, 2000. RAWCON 2000. 2000 IEEE*. IEEE, 2000. p. 135-138.
- [8]. BRUYANT, Nicolas. *ETUDE ET COMMANDE GENERALISEES DE FILTRES ACTIFS PARALLELES. Compensation globale ou sélective des harmoniques. Régime équilibré ou déséquilibré*. 1999. Thèse de doctorat.
- [9]. ALALI, Mohamad Alaa Eddin. *Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension:(Automatisation des systèmes de puissance électriques)*. 2002. Thèse de doctorat. Strasbourg 1.
- [10]. M. Lebziz " Etude de la pollution harmonique dans les réseaux industriels " Séminaire GL1K, Zone Industrielle, Skikda, 2005.
- [11]. WIERDA, René. Flicker ou scintillement des sources lumineuses. Cahier Technique Merlin Gerin CT176, 1995.
- [12]. FERRACCI, Philippe. La qualité de l'énergie électrique. *Cahier technique*, 2001, no 199, p.13.
- [13]. COLLOMBET, C., LUPIN, J. M., et SCHONEK, J. Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement, cahier technique n 152. *Schneider Electric*.

- [14]. Th. Deflandre & P. Mauras, " La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels & tertiaires. 1ère partie : Qualité de l'alimentation électrique", Les cahiers de l'ingénierie, Direction des Etudes & Recherche, Service Etudes de Réseaux, Département Postes & Lignes, EDF Industrie, France, 1997.
- [15]. Th. Deflandre & P. Mauras, " La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels & tertiaires. 2ème partie : Solution, mise en oeuvre et étude de cas ", Les cahiers de l'ingénierie, Direction des Etudes & Recherche, Service Etudes de Réseaux, Département Postes & Lignes, EDF Industrie, France, 1997.
- [16]. J. Arrillaga, N. R. Watson, " Power system quality assessment ", Nanyang Technological University Singapore, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, S. Chen, 1985.
- [17]. ROUND, Simon D. et DUKE, Richard M. Active filter optimisation for efficient variable frequency remote generation. In : *Industry Applications Society Annual Meeting, 1993., Conference Record of the 1993 IEEE*. IEEE, 1993. p. 894-898.
- [18]. STRATFORD, Ray P. Harmonic pollution on power systems-a change in philosophy. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1980, no 5, p. 617-623.
- [19]. GOMBERT, Christophe. *Simulation temps-réel des dispositifs d'électronique de puissance dédiés aux réseaux d'énergie électrique*. 2005. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [20]. PEJOVIC, Predrag et JANDA, Zarko. An improved current injection network for three-phase high-power-factor rectifiers that apply the third harmonic current injection. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2000, vol. 47, no 2, p. 497-499.
- [21]. AREDES, Mauricio, HEUMANN, Klemens, et WATANABE, Edson H. An universal active power line conditioner. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 13, no 2, p. 545-551.
- [22]. FUJITA, Hideaki et AKAGI, Hirofumi. The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt-active filters. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 13, no 2, p. 315-322.
- [23]. FUJITA, Hideaki et AKAGI, Hirofumi. A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active filters. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1991, vol. 27, no 6, p. 1020-1025.
- [24]. EL-HABROUK, M., DARWISH, M. K., et MEHTA, P. Active power filters: A review. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 2000, vol. 147, no 5, p. 403-413.
- [25]. CHENG, Po-Tai, BHATTACHARYA, Subhashish, et DIVAN, Deepak M. Control of square-wave inverters in high-power hybrid active filter systems. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 34, no 3, p. 458-472.

- [26]. DA SILVA, SA Oliveira, DONOSO-GARCIA, P., CORTIZO, Porfirio C., *et al.* A line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning for three-phase, four-wire systems. *International journal of electrical power & energy systems*, 2004, vol. 26, no 6, p. 399-411.
- [27]. DA SILVA, SA Oliveira, DONOSO-GARCIA, Pedro Francisco, CORTIZO, Porfirio Cabaleiro, *et al.* A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2002, vol. 38, no 6, p. 1581-1590.
- [28]. SHAFIEE KHOOR, Mohsen. *Amélioration de la qualité de l'énergie à l'aide de compensateurs actifs: série, parallèle ou conditionneurs unifiés de réseaux électriques*. 2006. Thèse de doctorat. Nantes.
- [29]. ZHANG, Yongchang, XIE, Wei, LI, Zhengxi, *et al.* Model predictive direct power control of a PWM rectifier with duty cycle optimization. *IEEE transactions on power electronics*, 2013, vol. 28, no 11, p. 5343-5351.
- [30]. SATYANARAYANA, G., PRASAD, K. N. V., KUMAR, G. Ranjith, *et al.* Improvement of power quality by using hybrid fuzzy controlled based IPQC at various load conditions. In : *Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013. p. 1243-1250.
- [31]. WEN-XING, Wang et XUE-LING, Zhu. Harmonic-Suppression System Based on Fuzzy Neural Control in Power Line. In : *Information Engineering (ICIE), 2010 WASE International Conference on*. IEEE, 2010. p. 93-96.
- [32]. HADIOUCHE, Djafar, RAZIK, Hubert, et REZZOUG, Abderrezak. On the modeling and design of dual-stator windings to minimize circulating harmonic currents for VSI fed AC machines. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 40, no 2, p. 506-515.
- [33]. GYUGYI, Laszlo et STRYCUDA, E. Cl. Active ac power filters. In : *Proc. IEEE/IAS Annu. Meeting*. 1976. p. 529-535.
- [34]. AKAGI, Hirofumi, NABAE, Akira, et ATOH, Satoshi. Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1986, no 3, p. 460-465.
- [35]. AKAGI, Hirofumi. New trends in active filters for power conditioning. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1996, vol. 32, no 6, p. 1312-1322.
- [36]. ABURTO, Victor, MORAN, L., SCHNEIDER, M., *et al.* An active power filter implemented with a three-level NPC voltage-source inverter. In : *IEEE Power Electronics Specialists Conference*. INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS INC (IEE0, 1997. p. 1121-1126.

- [37]. ARRILLAGA, J., JOOSTEN, A. P. B., et BAIRD, J. F. Increasing the pulse number of ac-dc convertors by current reinjection techniques. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, 1983, no 8, p. 2649-2655.
- [38]. SVENSSON, Jan et OTTERSTEN, Rolf. Shunt active filtering of vector current-controlled VSC at a moderate switching frequency. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1999, vol. 35, no 5, p. 1083-1090.
- [39]. INGRAM, David ME et ROUND, Simon D. A fully digital hysteresis current controller for an active power filter. *International journal of electronics*, 1999, vol. 86, no 10, p. 1217-1232.
- [40]. SINGH, Bhim, AL-HADDAD, Kamal, et CHANDRA, Ambrish. Harmonic elimination, reactive power compensation and load balancing in three-phase, four-wire electric distribution systems supplying non-linear loads. *Electric Power Systems Research*, 1998, vol. 44, no 2, p. 93-100.
- [41]. YUAN, Xiaoming, ALLMELING, Jost, MERK, Willi, *et al.* Stationary frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operation conditions. In : *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*. IEEE, 2000. p. 2143-2150.
- [42]. CANO, José Manuel, ORCAJO, Gonzalo Alonso, MAYORDOMO, J. F., *et al.* New transfer functions for an accurate estimation of harmonic distortion in AC/DC converters working under unbalanced conditions. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 2001, vol. 37, no 2, p. 642-649.
- [43]. BOLLEN, Math HJ et ZHANG, L. D. Different methods for classification of three-phase unbalanced voltage dips due to faults. *Electric power systems research*, 2003, vol. 66, no 1, p. 59-69.
- [44]. CHANG, Gary W. et SHEE, Tai-Chang. A novel reference compensation current strategy for shunt active power filter control. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 19, no 4, p. 1751-1758.
- [45]. MATTAVELLI, Paolo. An improved deadbeat control for UPS using disturbance observers. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 52, no 1, p. 206-212.
- [46]. JIN, Taotao, WEN, Jun, et SMEDLEY, Keyue. Control and topologies for three-phase three-level active power filters. In : *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE*. IEEE, 2005. p. 655-664.
- [47]. BENMEDDOUR, M., BOUMAHRAZ, M., et GHANEM, M. C. Facteur de Puissance Unitaire par Commande à Hystérésis Variable dans la Cascade Dévolteur-Survolteur. *Courrier du Savoir*, 2007, vol. 8.

- [48]. RACHMILDHA, Tri D., LLOR, Ana, FADEL, Maurice, *et al.* 3-Phase 4-Wire Active Power Filter using pqr Instantaneous Power Theory with Hybrid Approach. *Jurtek UI, March*, 2008.
- [49]. OUNEJJAR, Youssef, AL-HADDAD, Kamal, et GREGOIRE, L.-A. Novel three phase seven level PWM converter. In : *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE*. IEEE, 2009. p. 1-6.
- [50]. HOOSHMAND, Rahmat Allah et ESFAHANI, Mahdi Torabian. A new combined method in active filter design for power quality improvement in power systems. *ISA transactions*, 2011, vol. 50, no 2, p. 150-158.
- [51]. RAHMOUNI, A. Comparaison des performances de deux nouvelles méthodes de commande d'un filtre actif parallèle. *ACTA ELECTROTEHNICA*, 2012, vol. 53, no 4, p. 278-282.
- [52]. MESBAHI, Nadhir, OUARI, Ahmed, ABDESLAM, Djaffar Ould, *et al.* Direct power control of shunt active filter using high selectivity filter (HSF) under distorted or unbalanced conditions. *Electric Power Systems Research*, 2014, vol. 108, p. 113-123.
- [53]. SENTHILNATHAN, N. et MANIGANDAN, T. A Novel Control Strategy for Line Harmonic Reduction using Three Phase Shunt Active Filter with Balanced and Unbalanced Supply. *European Journal of Scientific Research*, 2012, vol. 67, no 3, p. 456-466.
- [54]. ASIMINOAEI, Lucian, BLAABJERG, Frede, et HANSEN, Steffan. Evaluation of harmonic detection methods for active power filter applications. In : *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2005. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE*. IEEE, 2005. p. 635-641.
- [55]. SALAM, Zainal, TAN, Perng Cheng, et JUSOH, Awang. Harmonics mitigation using active power filter: A technological review. *Elektrika*, 2006, vol. 8, no 2, p. 17-26.
- [56]. NAKAJIMA, T. et MASADA, E. An active power filter with monitoring of harmonic spectrum. In : *EPE-89, 3rd European conference on power electronics and applications, Aachen, Germany*. 1989.
- [57]. BENCHAITA, Lahlali. *Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle- commande*. 1998. Thèse de doctorat.
- [58]. CHELLI, Z., TOUFOUTI, R., OMEIRI, A., *et al.* Hysteresis Control for Shunt Active Power Filter under Unbalanced Three-Phase Load Conditions. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2015, vol. 2015.
- [59]. CHANDRA, Ambrish, SINGH, Bhim, SINGH, B. N., *et al.* An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2000, vol. 15, no 3, p. 495-507.

- [60]. GUFFON, Severine. *Modélisation et commandes à structure variable de filtres actifs de puissance*. 2000. Thèse de doctorat.
- [61]. AKAGI, Hirofumi, KANAZAWA, Yoshihira, et NABAE, Akira. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. In : *IPEC*. 1983. p. 1375-1386.
- [62]. OMEIRI, Amar. *Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant*. 2007. Thèse de doctorat.
- [63]. SINGH, Bhim, AL-HADDAD, Kamal, et CHANDRA, Ambrish. A review of active filters for power quality improvement. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 1999, vol. 46, no 5, p. 960-971.
- [64]. LE LAY, Ludovic. *Identification fréquentielle et temporelle par modèle non entier*. 1998. Thèse de doctorat.
- [65]. DASH, P. K., PANDA, S. K., LIEW, A. C., *et al.* A new approach to monitoring electric power quality. *Electric Power Systems Research*, 1998, vol. 46, no 1, p. 11-20.
- [66]. TOUZANI, Youssef. *Commande aléatoire du convertisseur Buck-Boost triphasé à prélèvement sinusoïdal du courant*. 2006. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II.
- [67]. BURRUS, C. S. S. et PARKS, Thomas W. *DFT/FFT and Convolution Algorithms: theory and Implementation*. John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [68]. TADJER, Sid Ahmed. *Étude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque" GPV"*. 2008.
- [69]. HOSTETTER, Gene H. Recursive discrete Fourier transformation. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 1980, vol. 28, no 2, p. 184-190.
- [70]. MALLAT, Stéphane. *Une exploration des signaux en ondelettes*. Editions Ecole Polytechnique, 2000.
- [71]. DJEGHLOUD, Hind. *Filtrage Actif de Puissance*. 2007. Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine.
- [72]. Mattavelli, P. *Closed-loop selective harmonic compensation for active filters*, *IEEE Trans. on Ind. App*, 2001, Vol. 37, No. 1, pp. 81-89.
- [73]. LASCU, Cristian, ASIMINOAEI, Lucian, BOLDEA, Ion, *et al.* High performance current controller for selective harmonic compensation in active power filters. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2007, vol. 22, no 5, p. 1826-1835.
- [74]. AKAGI, Hirofumi et FUJITA, Hideaki. A new power line conditioner for harmonic compensation in power systems. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 1995, vol. 10, no 3, p. 1570-1575.

- [75]. UCAR, Mehmet et OZDEMIR, Engin. Control of a 3-phase 4-leg active power filter under non-ideal mains voltage condition. *Electric Power Systems Research*, 2008, vol. 78, no 1, p. 58-73.
- [76]. ADAM, George, STAN, Alina G., et LIVINT, Gheorghe. A Matlab-Simulink Approach To Shunt Active Power Filters. In : *ECMS*. 2011. p. 205-210.
- [77]. ÖZDEMİR, Engin, KALE, Murat, et ÖZDEMİR, Şule. Active Power Filter for Power Compensation Under Non-Ideal Mains Voltages. In : *Proc. 11th Mediterranean Conference on Control and Automation, Rhodes, Grécia*. 2003.
- [78]. J. L. Afonso, C. Couto, J. S. Martins, Active Filters with Control Based on the p-q Theory, *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, vol. 47, n° 3, Set. 2000, p. 5-10.
- [79]. MONTERO, María Isabel Milanés, CADAVAL, Enrique Romero, et GONZÁLEZ, Fermín Barrero. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire systems. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 2007, vol. 22, no 1, p. 229-236.
- [80]. JOIN, Cédric. *Diagnostic des systemes non linéaires-Contribution aux méthodes de découplage*. 2002. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- [81]. ABDESLAM, D. Ould, WIRA, Patrice, MERCKLÉ, Jean, *et al.* Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle. *Revue Internationale du Génie Electrique,(RS-RIGE) p*, 2006, p. 35-64.
- [82]. KARUPPANAN, P., RAM, Saswat Kumar, et MAHAPATRA, KamalaKanta. Three level hysteresis current controller based active power filter for harmonic compensation. In : *Emerging Trends in Electrical and Computer Technology (ICETECT), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011. p. 407-412.
- [83]. KWON, Bong-Hwan, KIM, Tae-Woo, et YOUM, Jang-Hyoun. A novel SVM-based hysteresis current controller. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 1998, vol. 13, no 2, p. 297-307.
- [84]. KALE, Murat et OZDEMIR, Engin. An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter. *Electric Power Systems Research*, 2005, vol. 73, no 2, p. 113-119.
- [85]. JOSEPH, Deepthi, KALAIARASI, N., et RAJAN, K. A Novel Reference Current Generation Algorithm for Three Phase Shunt Active Power Filter. In : *Power Electronics and Renewable Energy Systems*. Springer India, 2015. p. 1467-1475.
- [86]. NEKKAR, Djamel. *Contribution à l'Etude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés*. 2014. Mémoire de magister.