



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université Dr. Tahar Moulay de Saida
Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique

Qualité de l'énergie électrique

Présenté par :

Dr. Rachedi Mohamed

Maître de conférences « B » en Electrotechnique

Mai 2019

Avant-propos

A l'issue de ce travail je tiens à adresser ma reconnaissance et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, à l'accomplissement de ce support pédagogique. Je souhaite que ce document fera l'objet d'aide mémoire et un axe d'orientation pour les futures lecteurs, désirant l'exploration du domaine de la qualité de l'énergie électrique.

Il me fait plaisir de réserver un grand respect et de reconnaissances, afin de remercier les personnes qui m'ont soutenu durant la réalisation de ce travail. Tout d'abord, je tiens à remercier vivement les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce support pédagogique :

- Prof, Azzedine Hamid
- Prof, Meziane Rachid

Je tiens à remercier mon chère frère Mellel résident au Canada pour son soutien pour réaliser cette phase, avec un grand respect que je lui dois.

À ma tendre épouse et mes enfants, qui ont dû être privées de leur mari et père certains soirs et fins de semaine. Vos nombreux sacrifices et votre support ont été pour moi une source de réconfort et d'encouragement.

Table des matières

Introduction générale

Chapitre I : Décomposition fréquentielle d'un signal périodique non sinusoïdal

I.1	Décomposition en série de Fourier des grandeurs électriques.....	1
I.2	Valeur efficace (True RMS).....	3
I.3	Valeur efficace des harmoniques.....	4
I.4	Taux de distorsion harmonique THD (en %).....	4
I.5	Puissance apparente S (en VA) de la charge.....	4
I.6	Puissance active P (en watts) consommée par la charge.....	4
I.7	Puissance réactive Q (en vars) consommée par la charge.....	5
I.8	Facteur de puissance PF (Power Factor) de la charge.....	5
I.9	Facteur de déplacement DPF (Displacement Power Factor).....	6
I.10	Puissance déformante.....	6
I.11	Application.....	7

Chapitre II : Synthèses des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques.

II.1	Introduction	
II.2	Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie.....	8
II.2.2	Optimisation du fonctionnement des installations électriques.....	9
II.2.4	Critères de la qualité de l'énergie électrique.....	9
II.3	Synthèses des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques	10
II.3.1	Charges industrielles génératrices d'harmoniques	
II.3.2	Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif.....	10
II.3.3	Convertisseur de courant	10
II.3.5	Phénomènes de résonance.....	11

II.3.6	Vibrations mécaniques	11
II.3.7	Effets sur le conducteur neutre	12
II.3.8	Creux de tension et coupures	12
II.3.9	Surtensions temporaires ou transitoires	12
II.3.10	Fluctuation lente de la tension (Flicker).....	13
II.3.11	Déséquilibre du système triphasé de tensions	14
II.4	Classification des harmoniques affectent la qualité de l'énergie électrique.....	14
II.4.1		
II.4.2	Harmoniques et inter-harmoniques.....	15
II.5	Génération des harmoniques et inter- harmoniques.....	16
	Notion de charge Linéaire et non-linéaire.....	18
II.6	Application.....	21
	Conclusion.....	22

Chapitre III : Normes et réglementations de la qualité de l'énergie électrique.

III.1	Introduction	
III.2	Règles générales de conception d'une installation électrique.....	23
III.2.1		
III.2.2	CEM : Compatibilité Électromagnétique.....	23
	Taux de distorsion en tension.....	23
III.2.3	Taux de distorsion en courant	24
III.3	Définition des plages de tensions.....	25
	Conclusion.....	25

Chapitre IV : Moyens de mitigation contre la pollution harmonique

IV.1	Introduction.....	26
IV.2	Remèdes théoriques et pratiques pour améliorer le facteur de puissance.....	26
IV.3	Solutions pour la compensation de la puissance réactive.....	28
IV.3.1	Compensation globale.....	28
IV.3.2	Compensation partielle.....	28
IV.3.2		
IV.4	Compensation individuelle.....	29
	Solutions de filtrage passif de la pollution harmoniques.....	31
IV.4.1	Filtres passifs.....	31
IV.4.2	Différents types de filtres passifs parallèles.....	32

IV.5	Avantages et inconvénients des filtres passifs	34
IV.6	Désavantages du filtrage passif.....	34
IV.7	Etude et dimensionnement des filtres passifs.....	35
IV.8	Exemple d'installation des filtres passifs.....	39
	Conclusion.....	40

Chapitre V : Compensation par Filtres Actifs et les Tendances Technologiques

V.1	Introduction	
V.2	La technologie des filtres actifs	41
V.2.1	Principe de base des filtres actifs	41
V.2.2	La qualité de l'énergie électrique sur le réseau monophasé	
V.3	La structure des filtres actifs.....	
V.4	La qualité de l'énergie sur le réseau triphasé.....	43
V.5.1	Principales combinaisons et structures de filtres actifs.....	43
V.5.2	Filtrage actif parallèle (shunt) FAP.....	45
V.5.3	Filtrage actif série FAS.....	46
V.5.4	Filtrage hybride (mixte actif -passif).....	46
V.5.5	Filtre actif série associe avec filtre passif en parallèle avec la charge.....	47
V.5.6	Filtre actif série associe avec filtre passif en série avec la charge.....	48
V.5.7	Filtre actif et filtres passif en parallèle avec la charge.....	49
V.5.8	Filtres hybrides parallèles dédiés à l'amortissement de la résonance.....	50
V.6	Filtrage par combinaison des deux filtres actifs (FAS/FAP).....	51
	Avantages et inconvénients des filtres actifs.....	51
		52
		52

Chapitre VI : Stratégies de commande et dimensionnement des filtres actifs

VI.1	Introduction.....	55
VI.2.	Commande par modulation de largeur d'impulsion MLI	55
VI.2.1	Principe Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	56
VI.3	Commande par hystérésis.....	57
VI.3.1	Commande par hystérésis modulée	58
VI.4	Mise en œuvre de la commande du filtre actif	59
VI.4.1	Génération de signaux de référence	60

VI.4.2	Algorithmes de contrôle dans le domaine fréquentiel.....	60
VI.4.3	Algorithmes de contrôle dans le domaine temporel	60
VI.4.3. 1	Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées	60
VI.4.3. 1	Méthode de commande basée sur le référentiel synchrone	64
VI.4.4	Filtre de Kalman	66
VI.5	Conclusion et résumé.....	66

Conclusion générale

Liste des symboles

Paramètres :

Cdc		Source de tension du filtre
Ldc		Source de courant du filtre
R_s	(Ω)	Résistance réseau,
R_{ch}	(Ω)	Resistance de la charge,
R_f	(Ω)	Resistance du filtre,
L_s	(Ω)	Inductance du réseau,
L_{ch}	(Ω)	Inductance charge,
L_f	(Ω)	Inductance filtre,
X		Réactance,
Xh		Réactance de l'inductance ou de la capacité à la fréquence d'accord h
Y	(Ω^{-1})	Admittance
Z	(Ω)	Impédance
G	(Ω)	Conductance
$Z0$	(Ω)	Impédance caractéristique du filtre
h		Indice harmonique

Repères :

Φ_n	(rd)	phase à l'origine de l'harmonique de rang n
φ_n	(rd)	déphasage entre rang n de la tension et de rang n du courant
β		Axe du système biphasé
α		Axe du système biphasé
p-q		Transformée des puissances instantanées

Grandeurs :

V_{eff}	(V)	Tension efficace
V		Tension instantanée
U		Tension onduleur
I_{eff}	(A)	Courant efficace,
I	(A)	Courant instantané
i_a^*		Courant de reference
P_{moy}	(W)	Puissance moyenne
p		Puissance instantanée

\bar{p}		Composante continue de la puissance active
\tilde{p}		Composantes de puissance alternatives liées au courant harmonique
p^*		Composante de référence puissance active
Q	(Var)	Puissance réactive
q		Puissance réactive instantanée
\bar{q}		Composante continue de puissance réactive
\tilde{q}		Composante alternatives de la puissance réactive
q^*		Composante de référence puissance réactive

T	(S)	Temps, instant
F	(Hz)	Fréquence fondamentale du réseau
F _c	(Hz)	Fréquence de coupure du filtre numérique butter-Worth
w	(rd/s)	pulsation du fondamental

Transformations :

s	(-)	Opérateur de Laplace,
TFD		Transformée de Fourier discrète
TFR		Transformée de Fourier rapide
TFDR		Transformée de Fourier discrète récursive

Sigles et Abréviations :

AC	(-)	Alternative curent (courant alternatif),
IGBT	(-)	Transistors bipolaires à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor),
GTO		Gate Turn off Thyristor.
THD		Total Harmonic Distorsion,
MLI		Modulation de Largeurs d'Impulsions.
PWM		Pulse Width Modulation,
PRC		Point de Raccordement Commun
FP		Facteur de puissance
FAP		Filtre actif parallèle.
FAS		Filtre actif série.
UPQC		Unified Power Quality Conditionner
PI		Régulateur proportionnel intégral.
SVM		Space Vector modulation
d-q		Repère de la transforme de Park
α - β		Transformée de Concordia

Introduction générale

La sensibilisation à la qualité de l'énergie électrique est devenue incontournable dans l'enseignement de l'électrotechnique d'aujourd'hui. Nous exposons dans ce document technique la position du problème de la qualité de l'énergie électrique. Les progrès technologiques modifient considérablement les usages avec la diffusion intensive des charges basées sur l'électronique de puissance, certes économiques mais très polluantes ce qui affecte directement la qualité de l'énergie. La maîtrise de la gestion de l'énergie passe au premier plan car gérer la production et assurer la continuité de service sont garant d'une bonne qualité de l'énergie sur le réseau. Au contraire, une mauvaise qualité de l'énergie peut causer des dysfonctionnements pouvant aller jusqu'à l'arrêt des services ce qui devient très préjudiciable sur le plan économique. Dans un souci d'améliorer l'efficacité énergétique et de parfaire la qualité de puissance, nous rappelons brièvement le contexte actuel et nous précisons les critères d'évaluation de la qualité de l'énergie électrique.

A défaut d'une bonne qualité de l'énergie électrique, les récepteurs sensibles aux perturbations harmoniques peuvent avoir un mauvais fonctionnement voir même sa défectuosité. Par voie de conséquence, il en résulte :

- L'arrêt temporaire d'un élément de la chaîne peut provoquer l'arrêt de l'outil de production (fabrication de semi-conducteurs, cimenterie, traitement de l'eau, manutention, imprimerie, sidérurgie, pétrochimie...) ou de services (centres de calcul, banques, télécommunications...).
- Le dysfonctionnement ou l'arrêt de récepteurs prioritaires tels que les ordinateurs, l'éclairage et systèmes de sécurité peuvent mettre en cause la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, locaux recevant du public, immeubles de grande hauteur...).
- La réduction du rendement énergétique de l'installation, ce qui alourdit la facture énergétique.
- La surcharge de l'installation, d'où son vieillissement prématuré avec le risque accru de panne qui conduit à un surdimensionnement des équipements de distribution.

Un des phénomènes important entraînant la dégradation de la qualité de l'énergie électrique est la présence de la pollution harmonique sur les réseaux électriques. Les conséquences les plus connues de ce phénomène sont : la destruction de condensateurs, le déclenchement intempestif de disjoncteurs [2], les phénomènes de résonance avec les éléments composant le réseau, réchauffement de conducteur de neutre et de transformateur ainsi que l'usure qui est due à réchauffement des équipements qui sont soumis aux harmoniques.

Dans le présent support pédagogique, une énoncé en guise de généralité, présentant les définitions de base, les causes de la pollution harmonique, ainsi que les effets néfastes sur la qualité de

l'énergie électrique. Ensuite, les moyens de mitigation classiques, les plus connus seront passés en revue. Les inconvénients de ces méthodes classiques, ont inévitablement orienté l'usages de la qualité de l'énergie électrique, vers les filtres actifs qui, actuellement offrent la solution la plus avantageuse. Dans ce sens, Les principales structures de filtre actif ainsi que leurs caractéristiques y seront alors présentées.

D'une façon pédagogique, ce travail, a été classé dans un ordre permettant la bonne compréhension et parallèlement, en saisissant les liaisons entre les différentes parties. En outre, les parties suivantes seront exposées :

- Chapitre I : Décomposition fréquentielle d'un signal périodique non sinusoïdal.
- Chapitre II : Synthèse des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques
- Chapitre III : Normes et réglementations de la qualité de l'énergie électrique.
- Chapitre IV : Moyens de mitigation contre la pollution harmonique
- Chapitre V : Compensation par Filtres Actifs et les Tendances Technologiques
- Chapitre VI : Stratégies de commande et dimensionnement des filtres actifs

CHAPITRE I

Décomposition Fréquentielle d'un Signal Périodique non Sinusoidal

Chapitre I : Décomposition fréquentielle d'un signal périodique non sinusoïdal

I.1 Décomposition en série de Fourier des grandeurs électrique

L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs de réseaux, car on dissocie l'étude à la fréquence fondamentale de celles relatives aux fréquences harmoniques. Cette décomposition, dite harmonique, est un artifice mathématique très commode, il ne s'agit pas d'un phénomène physique distinct car, en réalité, on observe que des signaux non sinusoïdaux et non pas réellement des harmoniques.

Au début du 19^e siècle, Joseph Fourier a montré qu'un signal périodique de fréquence f peut être décomposé avec des signaux sinusoïdaux de fréquences multiples entiers de f . Un signal périodique de fréquence f et de période $T=1/f$ peut donc s'écrire comme la somme de :

- Un terme constant qui correspond à la composante continue (c'est-à-dire la valeur moyenne dans le temps)
- Un terme sinusoïdal de fréquence f (c'est le fondamental ou harmonique de rang 1)
- Un terme sinusoïdal de fréquence $2f$ (harmonique de rang 2)
- Un terme sinusoïdal de fréquence $3f$ (harmonique de rang 3)
- Un terme sinusoïdal de fréquence $3f$ (harmonique de rang 4)
- etc ...

Dans le cas d'un courant électrique de fréquence f :

$$i(t) = I_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(n \cdot \omega t + \varphi_n) \quad (1.1)$$

Avec;

- * $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$: pulsation du fondamental (en radians par seconde)
- * I_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n (en ampères)
- * φ_n : phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians)

Pour la tension électrique v de fréquence f :

$$v(t) = v_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(n \cdot \omega t + \Phi_n + \varphi_n) \quad (1.2)$$

- * $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$: pulsation du fondamental (en radians par seconde)
- * V_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n (en volts)
- * $\Phi_n + \varphi_n$: phase à l'origine de l'harmonique de rang n (en radians)
- * φ_n : déphasage entre l'harmonique de rang n de la tension et l'harmonique de rang n du courant (en radians).

Tout courant périodique déformé peut être décomposé en une addition de courants sinusoïdaux présentant des amplitudes, fréquences et phases différentes. La fréquence la plus basse est appelée "fondamental". Toutes les autres sont un multiple du fondamental et sont appelées "harmoniques" comme sont montres dans la figure 1.2.

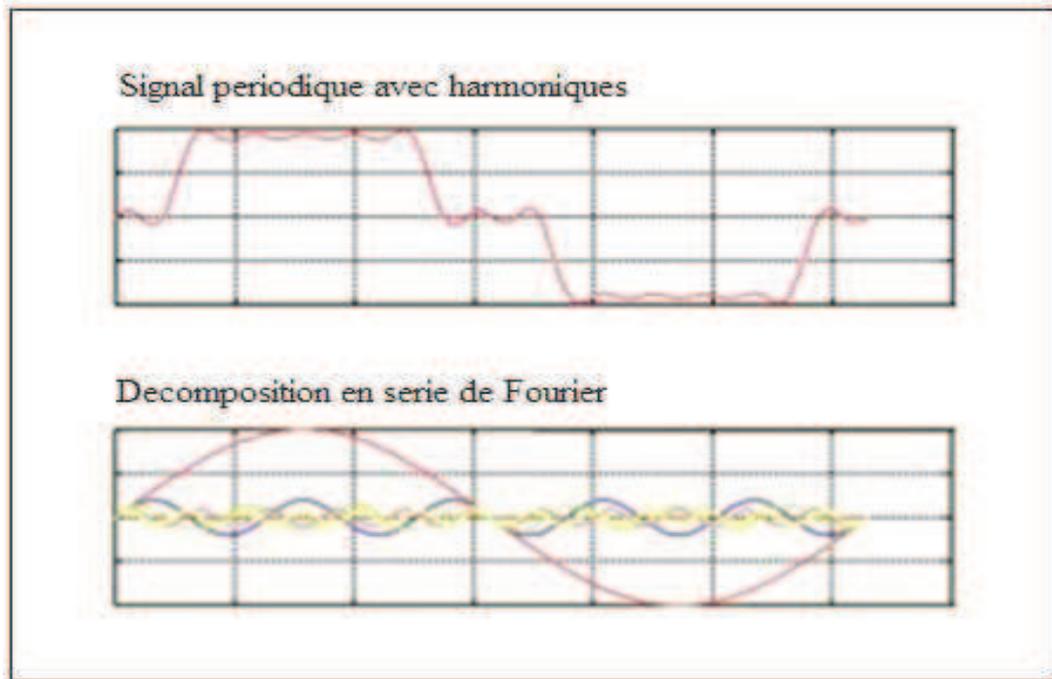


Figure 1.1 : Principe de décomposition en série de Fourier d'un signal périodique.

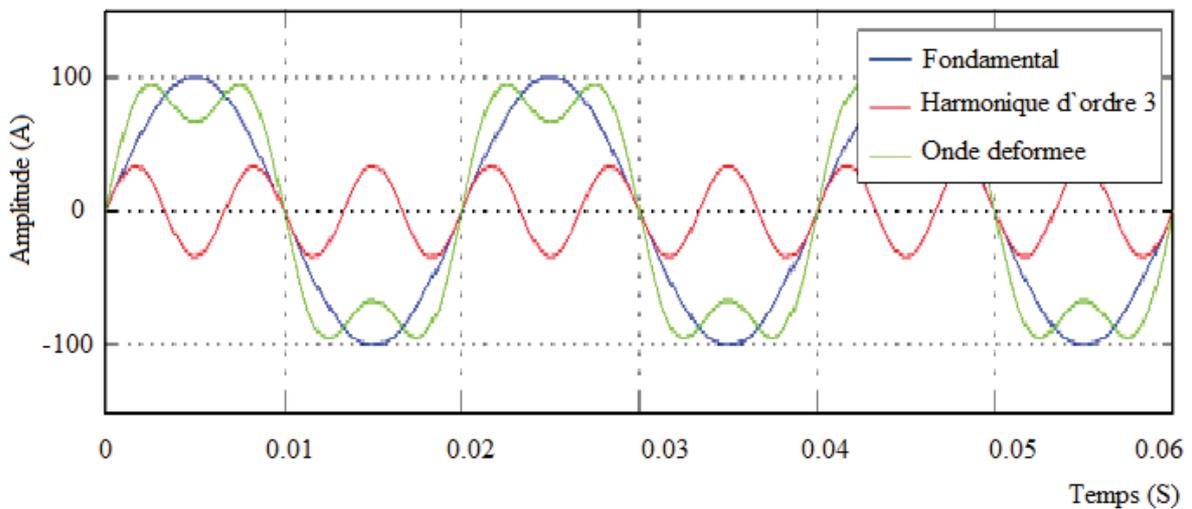


Figure 1.2 : Forme d'onde d'un signal déformé par des perturbations harmoniques

I.2 Valeur efficace (True RMS)

Par définition, la valeur efficace d'un courant périodique $i(t)$ est :

$$I_{eff} = \sqrt{I^2_{moy}} \quad (1.3)$$

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T i^2(t). dt} \quad (1.4)$$

On montre que :

$$I_{eff} = \sqrt{I_{moy}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (1.5)$$

Avec : I_n la valeur efficace de l'harmonique de rang n (en ampères)

Par définition, la valeur efficace d'une tension périodique $v(t)$ est :

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T V^2(t) \cdot dt} \quad (1.6)$$

$$V_{eff} = \sqrt{V_{moy}^2 + \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}$$

Avec : V_n la valeur efficace de l'harmonique de rang n (en volts)

I.3 Valeur efficace des harmoniques

Il s'agit de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques (à partir du rang 2).

Valeur efficace des courants harmoniques :

$$I_{effn} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (1.7)$$

$$V_{effn} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} \quad (1.8)$$

En globale, on a ;

$$I_{eff}^2 = I_{moy}^2 + I_{eff1}^2 + I_{effn}^2$$

$$V_{eff}^2 = V_{moy}^2 + V_{eff1}^2 + V_{effn}^2$$

I.4 Taux de distorsion harmonique THD (en %)

Le taux de distorsion d'un signal périodique traduit l'impacte des perturbations harmoniques sur la forme d'onde, ainsi, cautionne le spectre harmonique qui correspond au facteur de puissance de la qualité de l'énergie électrique.

Par définition le taux de distorsion est donne par l'expression suivante :

$$THD = \frac{\text{valeur efficace des harmoniques}}{\text{valeur efficace du fondamental}}$$

Le taux de distorsion du courant en % :

$$THD_i = 100 \cdot \frac{I_{effn}}{I_{eff1}} \quad (1.9)$$

Le taux de distorsion de la tension en % :

$$THD_v = 100 \cdot \frac{V_{effn}}{V_{eff1}} \quad (1.10)$$

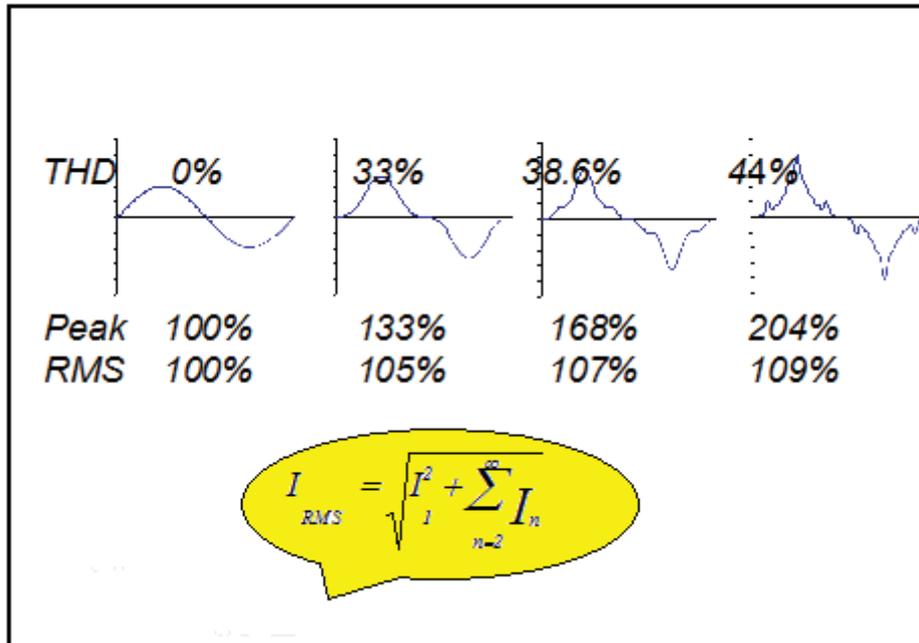


Figure 1.3: Impact de la distorsion harmonique

- Modification importante de la valeur crête (peak)
- Augmentation de la valeur RMS

I.5 Puissance apparente S (en VA) de la charge

La puissance apparente de la charge est par définition :

$$S = m.V.I$$

- m est le nombre de phases du réseau considéré.
- V tension de phase.
- I , courant de phase

I.6 Puissance active P (en watts) consommée par la charge

Par définition, c'est la moyenne dans le temps de la puissance instantanée consommée par la charge. C'est aussi la moyenne sur une période ($T = 1/f$) de la puissance instantanée :

$$p_{moy} = m.V_{moy}.I_{moy}$$

$$P_{moy} = \frac{1}{T} \int_{t=0}^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt$$

Cependant, l'expression générale de la puissance active instantanée, est donnée par :

$$P = P_{moy} + \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot \cos\phi_n \quad (1.11)$$

$$P = P_{moy} + P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n$$

- P_{moy} contribution des composantes continues.
- $V_1.I_1.Cos\varphi_1$; contribution des fondamentaux.
- $V_2.I_2.Cos\varphi_2$; contribution des harmoniques de rang 2
- $V_3.I_3.Cos\varphi_3$; contribution des harmoniques de rang 3
-
-
-
- $V_n.I_n.Cos\varphi_n$; contribution des harmoniques de rang n

I.7 Puissance réactive Q (en vars) consommée par la charge

Pour la plupart des charges électriques comme les moteurs, le courant I est en retard sur la tension V d'un angle φ . Si les courants et tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser un diagramme de représentation vectorielle. Dans ce diagramme vectoriel, le vecteur courant peut être décomposé en deux composantes: l'une en phase avec le vecteur tension (composante Ia), l'autre en quadrature (en retard de 90 degrés) avec le vecteur tension (composante Ir).

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n \cdot I_n \cdot Sin\varphi_n \tag{1.12}$$

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3+.....Q_n$$

- $Q = V_1.I_1.Sin\varphi_1$; contribution des fondamentaux.
- $Q_2 = V_2.I_2.Sin\varphi_2$; contribution des harmoniques de rang 2
- $Q_3 = V_3.I_3.Sin\varphi_3$; contribution des harmoniques de rang 3
-
-
-
- $Q_n = V_n.I_n.Sin\varphi_n$; contribution des harmoniques de rang n

I.8 Facteur de puissance PF (Power Factor) de la charge

Le facteur de puissance est un paramètre déterminant de la qualité de l'énergie électrique. Ainsi, le facteur de puissance doit être conforme aux exigences dictes conventionnellement entre le consommateur et le fournisseur, suivant une normalisation fixant cette qualité d'énergie. Par définition, le facteur de puissance est:

Le facteur de puissance est un indicateur de la qualité de la conception et de la gestion d'une installation électrique. Il repose sur deux notions très basiques : les puissances active et apparente.

La puissance active P (kW) est la puissance réelle transmise à des charges telles que moteurs, lampes, appareils de chauffage, ordinateurs. La puissance active est transformée en énergie mécanique, chaleur

ou lumière. Dans un circuit où la tension efficace appliquée est V_{eff} et la valeur efficace du courant est I_{eff} , la puissance apparente S (kVA) est le produit: $V_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$.

La puissance apparente est la base du dimensionnement de l'équipement électrique. Le facteur de puissance F_p est le rapport de la puissance active P (kW) sur la puissance apparente S (kVA) :

$$F_p = \frac{P}{S} = \cos\varphi \quad (1.13)$$

Avec $F_p \leq 1$

I.9 Facteur de déplacement DPF (Displacement Power Factor)

Par définition le facteur de déplacement est donné par :

$$DF_p = \cos\varphi_1 \quad (1.14)$$

φ_1 désigne le déphasage entre le fondamental de la tension et le fondamental du courant.

I.10 Puissance déformante

Cette puissance désigne la puissance qui contribue à la déformation du signal affecté par la pollution harmoniques.

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

$$D^2 = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)} \quad (1.15)$$

Avec :

- S^2 la puissance apparente en VA
- P^2 la puissance active en W.
- Q^2 la puissance réactive en VAR.
- D^2 la puissance déformante en VAD

I.11 Application

Exercice

L'analyse spectrale de la qualité de l'énergie électrique d'une alimentation est illustrée dans les figures a et b, dont sont montrées les formes d'ondes respectivement de la tension et du courant. En se servant des deux ordres harmoniques, calculer :

- 1) la valeur efficace du fondamental courant et tension ainsi, les valeurs efficaces du courant et tension harmoniques.
- 2) Taux de distorsion harmonique tension et courant : THDi, THDv.
- 3) Comment se comporte ce récepteur.
- 4) La puissance active, réactive et apparente.
- 5) Le facteur de puissance

Réponse

1. Valeur efficace du fondamental de la tension, $V_1=0.8861$, 60Hz,
Taux de distorsion de la tension, **THDv = 21.80%**
2. Valeur efficace du fondamental du courant, $I_1=2.843$, 60Hz,
3. Taux de distorsion du courant, **THDi = 32.05%**

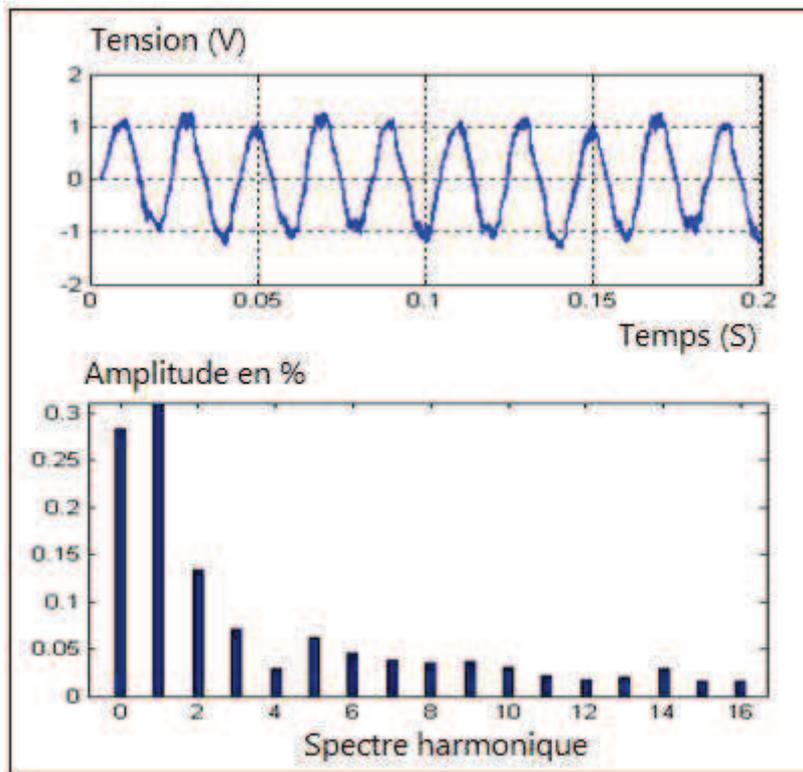


Figure a : Spectre harmonique de la tension

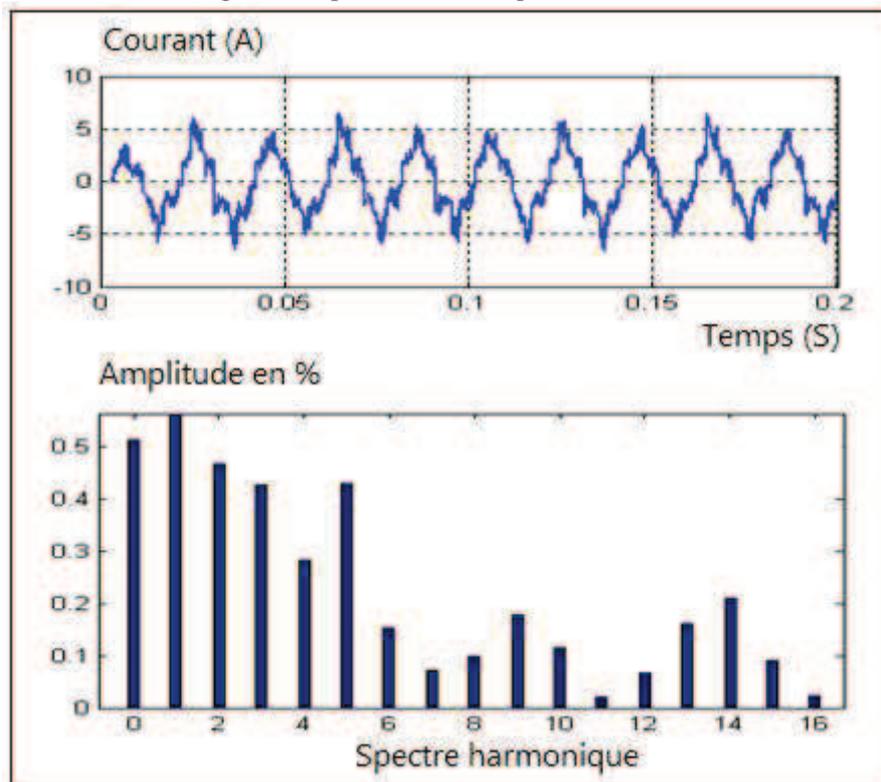


Figure b : Spectre harmonique du courant

CHAPITRE II

Synthèse des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques

Chapitre II : Synthèse des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques

II.1 Introduction

Depuis de nombreuses années, le distributeur d'énergie électrique s'efforce de garantir la qualité de la fourniture d'électricité. Les premiers efforts se sont portés sur la continuité de service afin de rendre toujours disponible l'accès à l'énergie chez l'utilisateur. Aujourd'hui, les critères de qualité ont évolué avec le développement des équipements où l'électronique prend une place prépondérante dans les systèmes de commande et de contrôle.

Ces dispositifs sensibles, mais qui dégradent également la qualité de la tension, existent dans toutes les catégories d'utilisateurs :

- dans le domaine industriel par l'emploi de constituants d'électronique de puissance ;
- dans le domaine tertiaire avec le développement de l'informatique ;
- dans le domaine domestique par l'utilisation en grand nombre des téléviseurs, magnétoscopes, lampes à économie d'énergie, ...

L'ouverture du marché de l'énergie électrique, la nécessité de garantir les productions pour les entreprises, font de la qualité de l'énergie électrique un enjeu majeur pour les compagnies d'électricité et pour les fabricants d'équipements. La notion de qualité du produit « électricité » est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation. Par exemple, une variation de 10 % de l'amplitude de la tension se traduira par une perte de couple de 19 % pour une machine asynchrone. Les équipements d'un utilisateur peuvent apporter des perturbations sur le réseau susceptibles de gêner les autres utilisateurs. Le distributeur (système d'alimentation) et l'utilisateur (installations) sont l'un et l'autre concernés par la qualité de l'électricité.

II.2 Objectifs de la mesure de la qualité de l'énergie

Des relations contractuelles peuvent s'établir entre fournisseur d'électricité et utilisateur final, mais aussi entre producteur et transporteur ou entre transporteur et distributeur dans le cadre d'un marché dérégulé. Une application contractuelle nécessite que les termes soient définis en commun et acceptés par les différentes parties. Il s'agit alors de définir les paramètres de mesure de la qualité et de comparer leurs valeurs à des limites prédéfinies voire contractuelles. Cette application implique souvent le traitement d'un nombre important de données.

II.2.1 Maintenance corrective

Malgré le respect des règles de l'art (conception de schéma, choix des protections, du régime de neutre et mise en place de solutions adaptées) dès la phase de conception, des dysfonctionnements peuvent apparaître en cours d'exploitation [1] :

- les perturbations peuvent avoir été négligées ou sous-estimées,
- l'installation a évolué (nouvelles charges et /ou modification).

C'est généralement suite à ces problèmes qu'une action de dépannage est engagée. L'objectif est souvent d'obtenir des résultats aussi rapidement que possible, ce qui peut conduire à des conclusions hâtives ou infondées. Des systèmes de mesure portatifs (sur des temps limités) ou des appareils fixes (surveillance permanente) facilitent le diagnostic des installations (détection et archivage des perturbations et déclenchement d'alarmes).

II.2.2 Optimisation du fonctionnement des installations électriques

Pour réaliser des gains de productivité (économies de fonctionnement et / ou réduction des coûts d'exploitation) il faut avoir un bon fonctionnement des procédés et une bonne gestion de l'énergie, deux facteurs qui dépendent de la qualité d'énergie électrique. Disposer d'une qualité d'énergie électrique adaptée aux besoins est un objectif des personnels d'exploitation, de maintenance et de gestion de sites tertiaires ou industriels. Des outils logiciels complémentaires assurant le contrôle-commande et la surveillance permanente de l'installation sont alors nécessaires.

II.2.3 Enquêtes statistiques [1]

Cette étude nécessite une approche statistique sur la base de nombreux résultats obtenus par des enquêtes généralement réalisées par les exploitants de réseaux de transport et de distribution.

a. *Enquêtes sur les performances générales d'un réseau*

Elles permettent, par exemple, de :

- Planifier et cibler les interventions préventives grâce à une cartographie des niveaux de perturbations sur un réseau. Ceci permet de réduire les coûts d'exploitation ainsi qu'une meilleure maîtrise des perturbations. Une situation anormale par rapport à un niveau moyen peut être détectée et être corrélée avec le raccordement de nouvelles charges. Les tendances saisonnières ou des dérives peuvent aussi être étudiées.
- Comparer la QEE fournie par différents distributeurs en différents lieux géographiques. Des clients potentiels peuvent en effet demander des caractéristiques de fiabilité pour la fourniture de l'électricité avant d'installer de nouvelles usines.

b. *Enquêtes sur les performances en un point particulier du réseau.*

Elles permettent de :

- Déterminer l'environnement électromagnétique auquel une installation future ou un nouvel équipement sera soumis. Des actions d'amélioration du réseau de distribution et/ou de désensibilisation du réseau du client peuvent alors être engagées de façon préventive.
- Spécifier et vérifier les performances auxquelles le fournisseur d'électricité s'engage de façon contractuelle. Ces informations sur la qualité de l'électricité sont particulièrement stratégiques pour les compagnies d'électricité qui dans le contexte de la libéralisation du marché de l'énergie recherchent la meilleure compétitivité, la satisfaction des besoins et la fidélisation de leurs clients.

II.2.4 Critères de la qualité de l'énergie électrique

Les critères de qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques. On parle de Compatibilité Electromagnétique (C. E. M.) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs. La CEM classe ces perturbations selon deux groupes [3]:

- basses fréquences (< 9 kHz) ;
- hautes fréquences (> 9 kHz).

D'autre part, ces phénomènes sont caractérisés selon leur mode de transmission : on parlera de perturbations conduites et de perturbations rayonnées.

II.3 Synthèses des perturbations harmoniques dans les réseaux électriques

La qualité de l'énergie électrique est un indicateur de la santé des équipements électriques branchés sur le réseau. La santé des équipements (bon fonctionnement, défaillance, durée de vie, etc.) est affectée directement par la qualité du réseau à l'intérieur du bâtiment et surtout de la tension disponible sur chacune des prises électriques. Cependant, garder une bonne qualité de l'énergie c'est équivalent à protéger ces équipements contre l'environnement des pollutions.

Plusieurs techniques sont actuellement disponibles pour aider à améliorer la qualité de l'énergie. Si les équipements sont déjà installés, comment améliorer la qualité et éviter les problèmes? Ajouter le critère qualité de l'énergie au départ, et ceci avant d'arrêter le choix et par la suite l'acquisition de l'équipement. Il ne faut pas oublier que la meilleure technique de protection est à la source.

II.3.1 Charges industrielles génératrices d'harmoniques

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

II.3.2 Redresseur triphasé à diodes et filtre capacitif

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

II.3.3 Convertisseur de courant

Les convertisseurs de courant constituent l'un des montages les plus répandus dans le secteur industriel. Ce type de montage est constitué de thyristors qui sont commandés en ouverture. Ceci ce fait en jouant sur l'angle d'allumage α de commande des gâchettes des thyristors. Ils sont utilisés dans de nombreuses applications telles que :

a. La commande en vitesse variable des moteurs à courant continu

Les machines à courant continu sont utilisées dans de multiples activités nécessitant de la vitesse variable aussi bien dans les applications de faible puissance que celle de grande puissance telles les machines outils, les procédés de commande dans l'industrie du papier et du textile ainsi que les laminoirs.

b. La commande en vitesse variable des machines synchrones

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

c. Les électrolyseurs

L'électrolyse est surtout employée dans la production des métaux non ferreux et dans l'industrie de la chimie.

d. Les fours à induction régulés

Ces derniers sont utilisés majoritairement dans les secteurs industriels des métaux, de la chimie et de la galvanoplastie.

II.3.4 Les appareils à arc électrique

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc à courant alternatif ou continu. Les fours à arc sont majoritairement présents dans la transformation de l'acier et la métallurgie, ainsi que dans les secteurs de la mécanique et de l'électricité [1].

II.3.5 Phénomènes de résonance

L'apparition de phénomènes de résonance est due à la présence sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs. Le danger de ce phénomène est qu'il peut engendrer de grandes valeurs d'impédance Z_n , de tension V_n et de courant harmonique I_n aux bornes des différents éléments composant le réseau. Lorsque ces valeurs de tension et de courant harmoniques sont trop élevées, ils peuvent endommager et même détruire les équipements qui y sont soumis.

II.3.6 Vibrations mécaniques

La présence d'harmoniques peut engendrer des couples mécaniques pulsatoires à l'arbre des moteurs asynchrones. Ces couples, qui sont dus aux champs tournant harmoniques, engendrent des vibrations dans les moteurs asynchrones. Pour ce qui est des transformateurs, ils peuvent être susceptibles d'entrer en résonance mécanique aux fréquences harmoniques, ce qui peut entraîner une usure prématurée de cet équipement.

II.3.7 Effets sur le conducteur neutre

Dans un système équilibré, les composantes homopolaires dans le neutre sont nulles. Ceci n'est pas le cas des systèmes comportant une charge non linéaire [2]. En effet, les courants homopolaires des harmoniques de rang multiple de 3 vont s'additionner dans le conducteur neutre. L'intensité de ces courants superposés peut endommager sérieusement le câble neutre.

II.3.8 Creux de tension et coupures

Un creux de tension est une chute brutale de l'amplitude de la tension. Il est caractérisé par :

- sa profondeur (ΔU)
- sa durée (Δt)

La norme EN50160 fixe la diminution de la tension à une valeur située entre 1 et 90 % de la tension nominale pendant une durée de $\frac{1}{2}$ période à 50Hz soit 10 ms jusqu'à une minute. La mesure d'un creux de tension s'effectue par la détermination de la valeur efficace de la tension toutes les $\frac{1}{2}$ périodes (avec recouvrement d'une $\frac{1}{2}$ période).

De manière générale, les perturbations en électrotechnique appartiennent à la basse fréquence dont la transmission est conduite. Les phénomènes observés sont nombreux : creux de tension et coupures, sur tensions temporaires ou transitoires, fluctuations lentes de la tension (flicker), variations de la fréquence, déséquilibres du système triphasé, harmoniques et inter harmoniques, tensions continues dans les réseaux alternatifs, ... Ils peuvent être regroupés en quatre catégories selon qu'ils affectent :

- * l'amplitude,
- * la forme d'onde,
- * la fréquence,
- * la symétrie du système triphasé.

Une coupure brève est un cas particulier du creux de tension. Sa profondeur est supérieure à 90 % et elle est caractérisée uniquement par sa durée (inférieure à 3 minutes). Les coupures longues sont supérieures à 3 minutes.

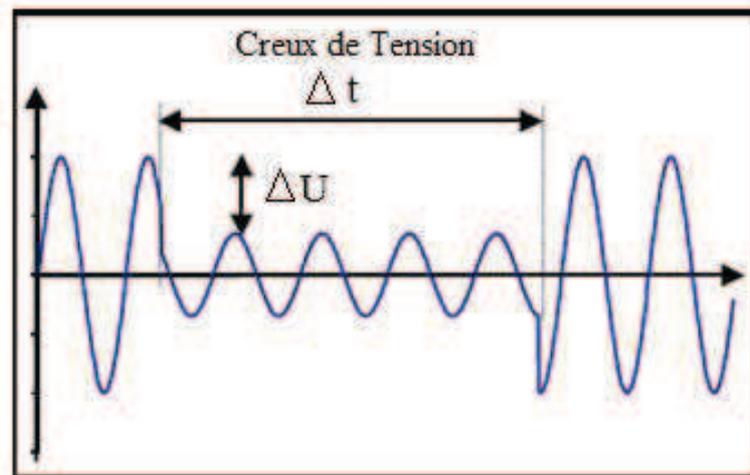


Figure 2.1 : Forme d'onde de la tension perturbée par creux de tension

Les creux de tension sont dus à l'apparition de défauts sur l'installation ou sur le réseau de distribution. Les coupures brèves sont généralement la cause de manœuvres des automatismes des réseaux de distribution (réenclencheurs, isolations de défaut).

II.3.9 Surtensions temporaires ou transitoires

La norme EN50160 fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation :

- réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance) : la surtension ne devra pas dépasser $1,7 U_n$;
- réseaux à neutre isolé ou résonant : la surtension ne devra pas dépasser $2 U_n$.

Les surtensions sont de trois natures :

- Surtensions à la fréquence industrielle (50 Hz) ;
- surtensions de manœuvre;
- surtensions atmosphériques.

Elles apparaissent selon deux modes :

1. mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre) ;
2. mode différentiel (entre conducteurs actifs, phase – phase ou phase – neutre).

On observe un plus grand nombre de creux de tension et de coupures sur les réseaux aériens que sur les réseaux souterrains du fait des intempéries (excepté, bien entendu, s'ils sont raccordés sur le même départ).

Les surtensions à la fréquence industrielle prennent naissance suite à un défaut d'isolement entre phase et terre, lors d'une surcompensation de l'énergie réactive ou encore lors d'une Ferro résonance provoquée par un circuit inductif et un condensateur. Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure du réseau : mise en service de gradins de condensateur, d'une ligne à vide. Les surtensions atmosphériques sont provoquées par la foudre soit directement, soit indirectement par augmentation du potentiel de la terre.

II.3.10 Fluctuation lente de la tension (Flicker)

La fluctuation lente de la tension est une diminution de la valeur efficace de la tension de moins de 10 %. La tension est modulée en amplitude par une enveloppe dont la fréquence est comprise entre 0,5 et 25 Hz. Le phénomène est dû à la propagation sur les lignes du réseau d'appels de courants importants à la mise en service ou hors service d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide (les fours à arcs, les machines à souder, les moteurs à démarrages fréquents, ...)

Les conséquences de la fluctuation lente de la tension s'observent essentiellement sur des lampes à incandescence où elle provoque un papillotement du flux lumineux(Flicker). Cette gêne visuelle est perceptible pour une variation de 1 %de la tension.

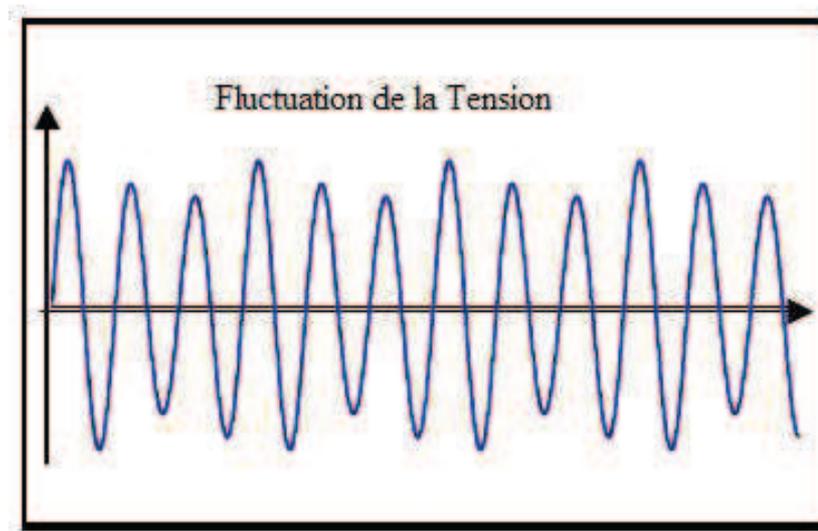


Figure 2.2 : Forme d'onde de la fluctuation de la tension

II.3.11 Déséquilibre du système triphasé de tensions

Le déséquilibre du système triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou déphasées de 120° les unes par rapport aux autres. La quantification du phénomène fait appel à la décomposition de la composante fondamentale selon les composantes symétriques de Fortescue. On définit un degré de déséquilibre inverse et un degré de déséquilibre homopolaire :

- le degré de déséquilibre inverse est le rapport entre la composante inverse du fondamental de la tension et sa composante directe:

$$\Delta U_i = \frac{|U_{1i}|}{|U_{1d}|}$$

- le degré de déséquilibre homopolaire est le rapport entre la composante homopolaire du fondamental de la tension et sa composante directe :

$$\Delta U_0 = \frac{|U_{10}|}{|U_{1d}|}$$

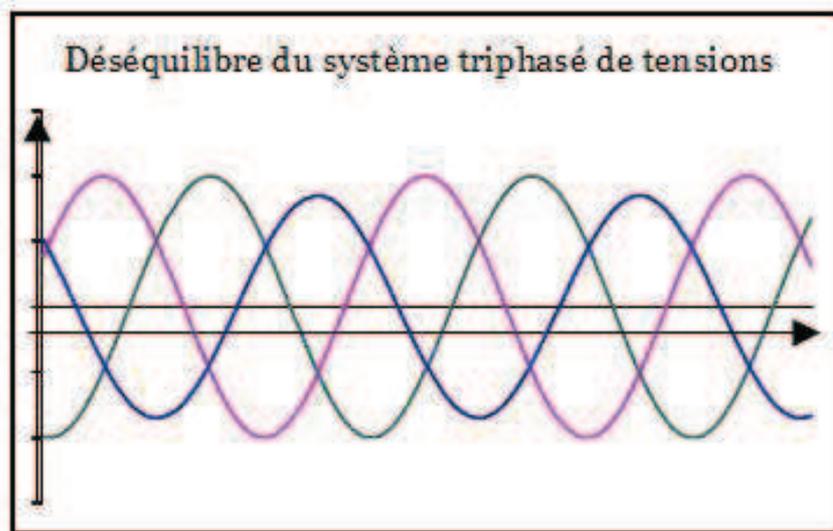


Figure 2.3 : Forme d'onde de la tension d'un système triphasé déséquilibré.

La norme **EN50160** fixe le taux de déséquilibre inverse admissible à 2 % sur les valeurs efficaces calculées sur 10 minutes pour 95 % du temps d'une semaine.

Le déséquilibre du système triphasé de tension est essentiellement dû à charges monophasées ou déséquilibrées raccordées sur le réseau. Les conséquences sont l'augmentation de l'échauffement des machines asynchrones, l'existence de couple inverse et conduisent à dégradation prématurée des machines.

II.4 Classification des harmoniques affectent la qualité de l'énergie électrique

II.4.1 Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont des signaux de fréquence multiple de la fréquence industrielle. Ils sont générés par des charges dites non-linéaires. Certains appareils ne présentent pas une impédance constante durant la durée de l'alternance de la sinusoïde de tension à 50 Hz. Ils absorbent alors un courant non sinusoïdal qui se propage dans le réseau et déforme ainsi l'allure de la tension. Une tension ou un courant déformé par rapport à la sinusoïde de référence peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux de fréquence multiples à celle du fondamental (50Hz pour le réseau de distribution). Chaque composante est caractérisée par son rang (par exemple rang 5 pour une composante à la fréquence de 250Hz, soit 5 x 50 Hz) et par son amplitude exprimée en pourcentage par rapport à celle du fondamental. On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant :

$$THDu = 100 * \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Un^2}}{U1}$$

C'est le rapport, exprimé en pourcent, entre la valeur efficace des composantes harmoniques et l'amplitude du fondamental. La borne supérieure est fixée par la norme EN50160 au 40^e rang, c'est-à-dire à 3 kHz pour la fréquence industrielle.

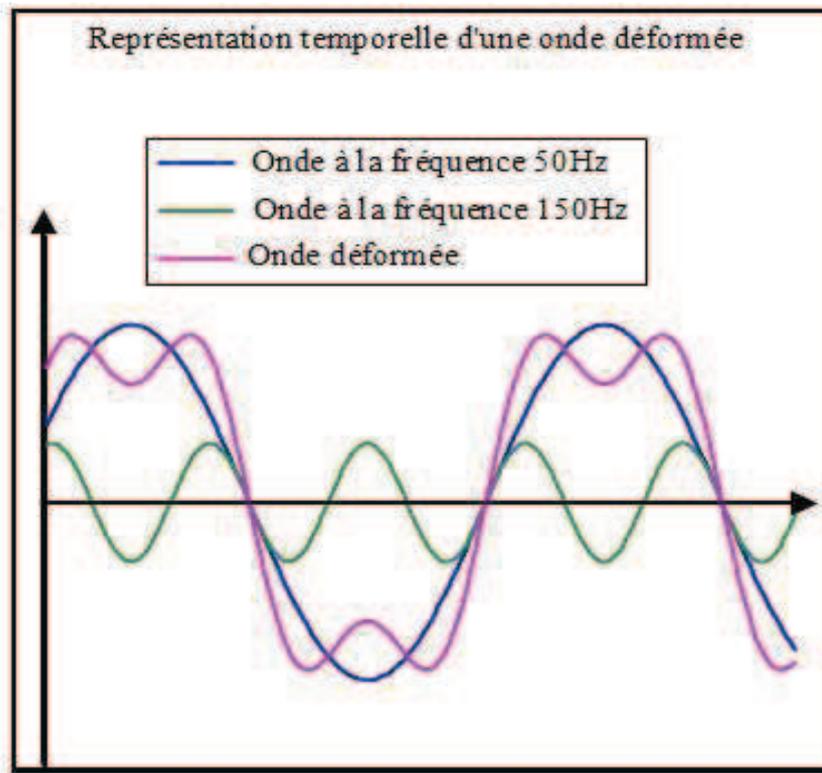


Figure 2.4 : Forme d'onde déformée par harmonique gênant

Les inter-harmoniques sont des signaux non multiples de la fréquence industrielle. Les variateurs de vitesses pour machines asynchrones, les fours à arcs sont les principaux générateurs d'inter-harmoniques.

On distingue les effets instantanés et les effets à terme. Les effets instantanés font suite à un phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation. Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement (condensateurs, disjoncteur). D'autres troubles fonctionnels sont liés à la déformation de l'onde de tension tels que :

Couples pulsatoires sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesure (selon leur bande passante), perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation. Les effets à termes se traduisent par une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclassement des équipements.

La norme EN50160 fixe les niveaux de tensions harmoniques jusqu'au 25^{ème} rang et indique que le taux global de distorsion harmonique ne doit pas dépasser 8 %. Des solutions de dépollution harmoniques existent :

Le filtrage passif qui consiste à installer un circuit L, C en série accordé sur la fréquence de la composante à éliminer ;

- le filtrage actif génère des composantes harmoniques aux mêmes fréquences et en opposition de phase aux perturbations mesurées ;
- le filtrage hybride combine les solutions passive et active ;
- l'utilisation d'appareils à absorption sinusoïdale (appareils dits « propres »).

Les nouveaux équipements de petite puissance sont soumis à des normes limitant les perturbations harmoniques.

II.4.2 Génération des harmoniques et inter- harmoniques

Les harmoniques présents sur le réseau de distribution électrique proviennent majoritairement des charges non linéaires qui génèrent des courants harmoniques mais ils peuvent aussi être créés par les sources génératrices de tension. Les charges non linéaires représentent de nombreux équipements industriels et domestiques et se répartissent dans de nombreux secteurs industriels. Ces appareils possèdent en entrée un système de conversion d'énergie sous une forme donnée en une autre forme en adéquation avec l'utilisation voulue. C'est des convertisseurs statiques qui sont mis en œuvre et qui peuvent être répertoriés en quatre familles :

- * Convertisseurs AC-DC, cela représente l'ensemble des redresseurs,
- * Convertisseurs DC-DC, hacheurs et alimentations à découpage,
- * Convertisseurs DC-AC, onduleurs de tension ou de courant,
- * Convertisseurs AC-AC, gradateurs, convertisseurs de fréquences.

Ces dispositifs polluants sont classés en fonction des puissances et donc du niveau de perturbations qu'ils entraînent. Ainsi, les charges industrielles arrivent logiquement en première position et il est possible de recenser les applications suivantes :

- ▶ Systèmes utilisant des redresseurs à diodes ou à thyristors tels que les variateurs des moteurs électriques (à courant continu, asynchrones, synchrones), les fours à induction, les chargeurs de batterie, les électrolyseurs, les alimentations de secours,...
- ▶ Les récepteurs utilisant l'arc électrique : fours à arc ou soudure à arc,
- ▶ Les variateurs de lumières à base de gradateurs,
- ▶ Téléviseurs et éléments périphériques,
- ▶ Micro-informatique, Four à micro-ondes, Aspirateurs, Robots ménagers.

Pour l'ensemble de ces charges polluantes, un critère supplémentaire est à prendre en compte, c'est le facteur d'utilisation. En effet, la quantification du taux d'harmonique dépend de la durée et de la simultanéité du fonctionnement de ces charges non linéaires. Il est à noter qu'il existe aussi des perturbations sur des rangs harmoniques non multiple entier du fondamental. Ces derniers se dénomment inter ou infra harmoniques. Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas des fréquences entières de celle du fondamental. Les infra harmoniques sont des composantes qui sont des fréquences inférieures à celle du fondamental. Ces deux catégories de perturbations sont dues à des variations périodiques et aléatoires de la puissance absorbée par certains appareils. La figure 2.5 illustre cette répartition.

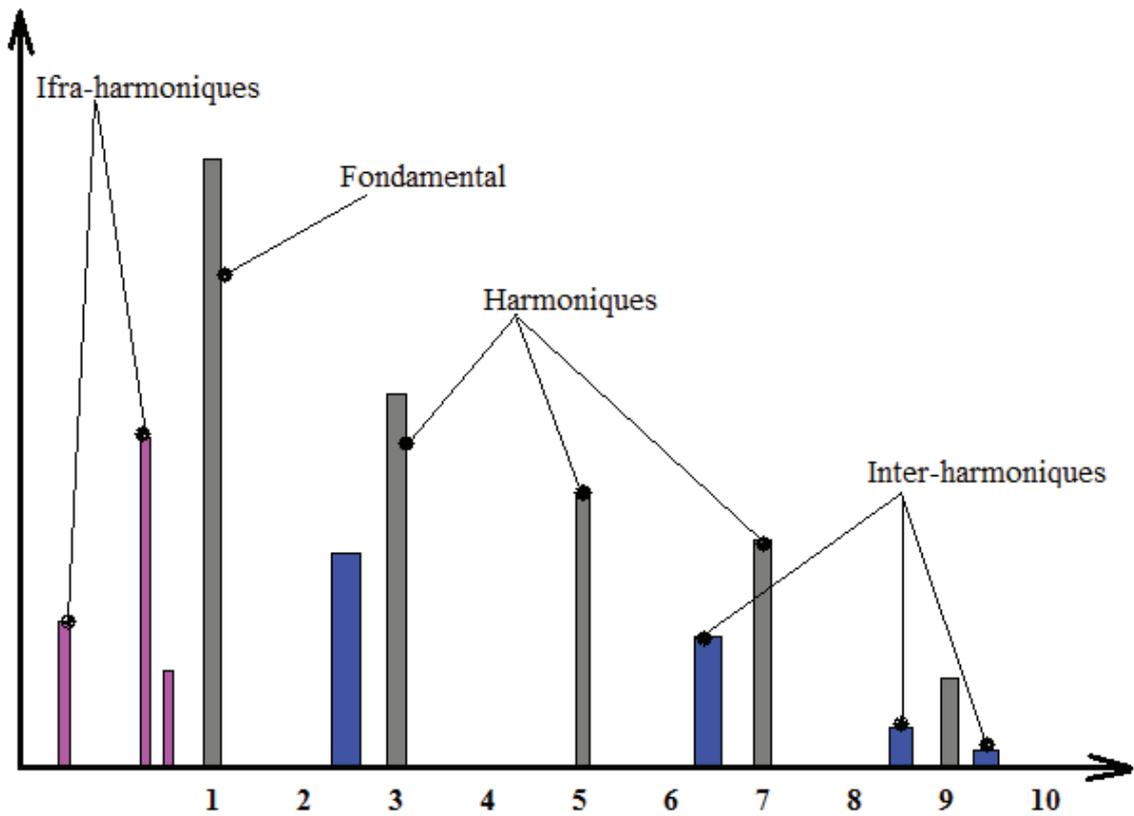


Figure 2.5 : Différents rangs harmoniques, multiple entier du fondamental et non multiple entier du fondamental

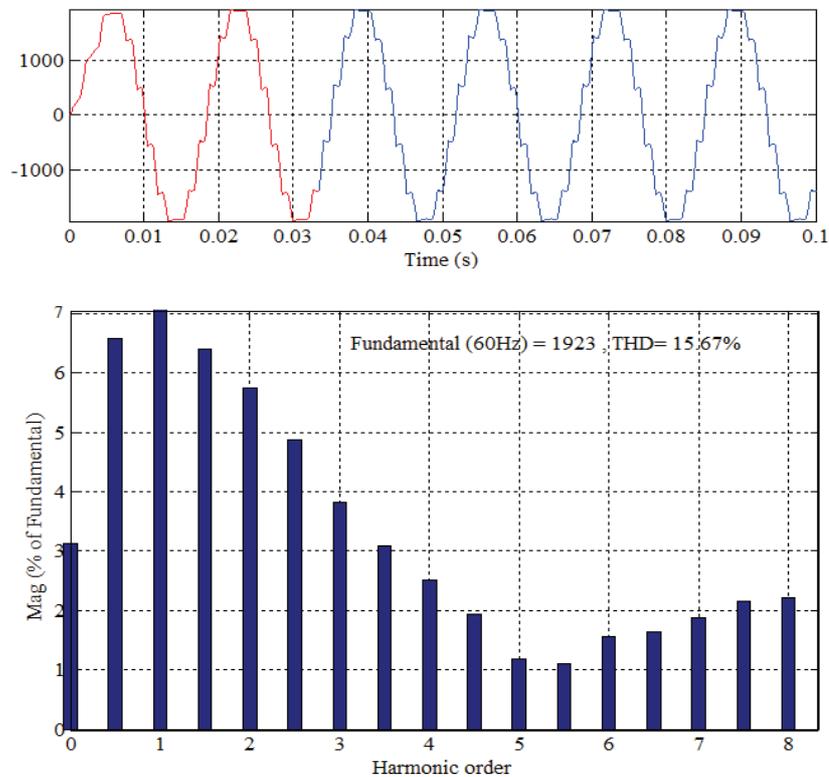


Figure 2.6 : présentation de spectre harmonique d'un signal avec grande perturbations harmoniques.

II.5 Notion de charge Linéaire et non-linéaire

Diodes, thyristors et tous les autres semi-conducteurs de puissance sont très utilisés pour contrôler l'écoulement de l'énergie dans les charges comme: Drives (ASDs), Ordinateurs, toutes les sources d'alimentations, les sources d'énergie renouvelables, etc. 75% de l'énergie produite transite par les convertisseurs statiques.

Ces convertisseurs absorbent un courant non sinusoïdale, et échange de l'énergie réactive avec la source d'alimentation. Dans le système triphasé, ces harmoniques causent un déséquilibre de la tension et un courant excessif circulant dans le conducteur de neutre.

- * Une charge est dite **linéaire** si le courant qu'elle absorbe est **sinusoïdal** lorsqu'elle est alimentée par une tension **sinusoïdale**.
- * Une charge est dite **non linéaire** si le courant qu'elle absorbe n'est **pas sinusoïdal** lorsqu'elle est alimentée par une tension **sinusoïdale**.

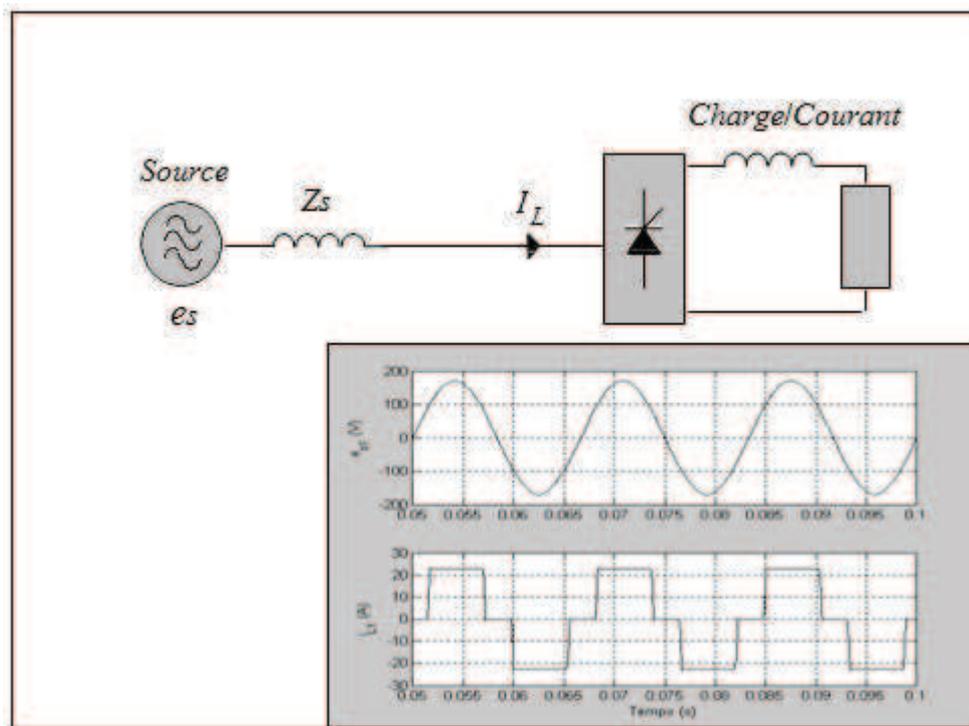


Figure 2.7 : Charge type source de courant

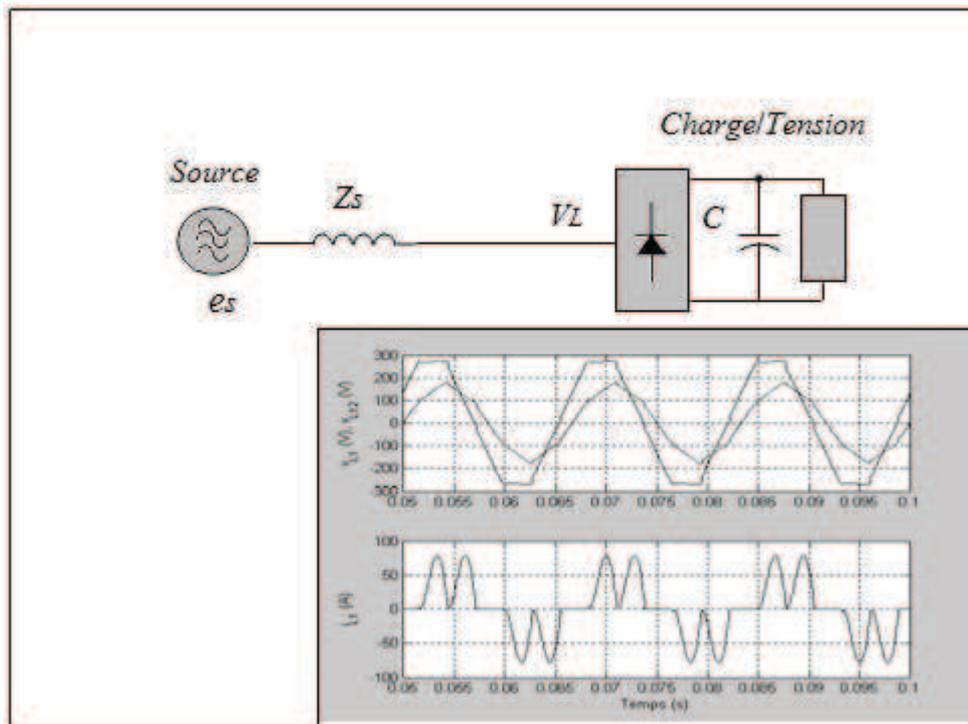


Figure 2.8 : Charge type source de tension

II.6 Application

On s'intéresse à une installation monophasée de 30 ampoules basses consommations (OSRAM Duluxe EL 15 W / 840 120 mA 230 V 50 Hz).

L'analyseur de puissances CA8220 est associé à une sonde de courant E3N. Les chronogrammes de la tension et du courant permettent les données suivantes :

- Fréquence : 49,98 Hz
- Valeur efficace de la tension : $V = 227,4$ V
- Valeur efficace du courant : $I = 2,81$ A

En se servant des spectres de la tension et du courant des figures II.a et II.b calculer :

- 1) la valeur efficace du fondamental courant et tension
- 2) Valeur efficace du courant et tension harmonique courant et tension
- 3) Taux de distorsion harmonique : $THDi$, $THDv$.
- 4) Comment se comporte L'ampoule basse consommation.
- 5) La puissance active, réactive et apparente.
- 6) Le facteur de puissance.

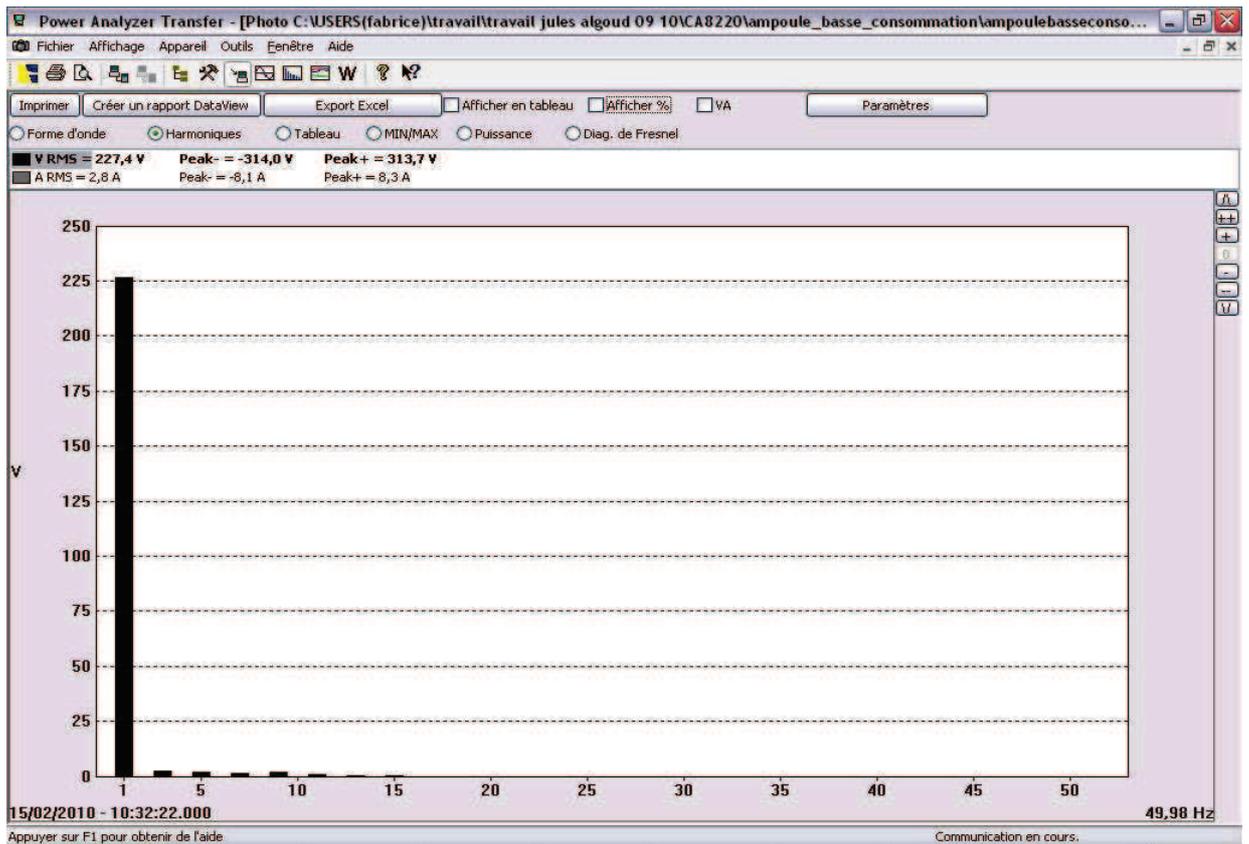


Figure II.a : Spectre du courant

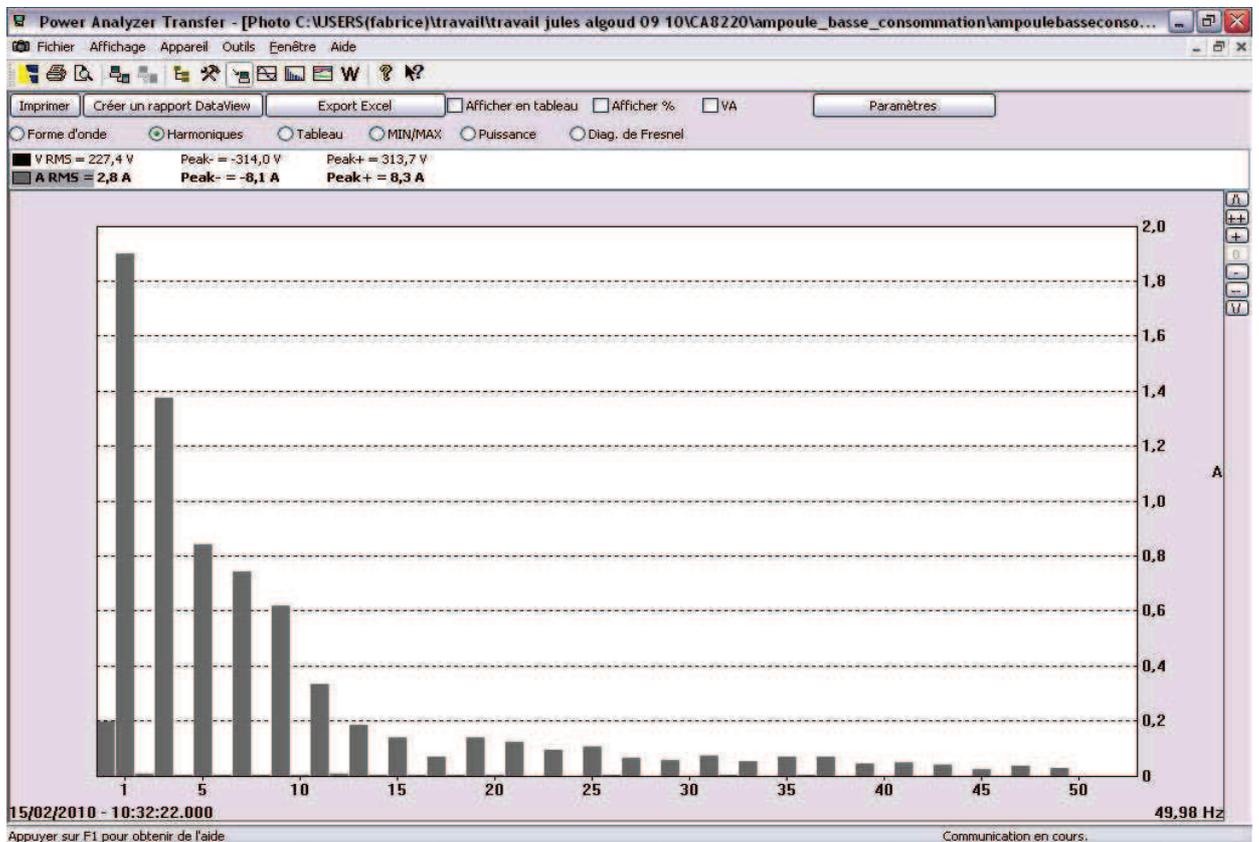


Figure II.b : Spectre de la tension

Réponse :

Valeur efficace du fondamental : $I_1 = 1,95 \text{ A}$

Valeur efficace du courant harmonique : $I_{HM} = 2,01 \text{ A}$

Taux de distorsion harmonique : $\text{THDi} = I_{HM} / I_1 = 103 \%$

L'ampoule basse consommation est fortement non linéaire.

1. Puissance apparente : $S = VI = 638,7 \text{ VA}$
 2. Puissance active : $P = 406,3 \text{ W}$
 3. Facteur de puissance : $\text{PF} = P/S = 0,636$
 4. Déphasage entre le fondamental de la tension et le fondamental du courant : $j_1 = -23,5^\circ$ (le courant est en avance sur la tension)
 - Facteur de déplacement : $\text{DPF} = \cos j_1 = 0,916$ ($> \text{PF}$)
- Puissance réactive : $Q = -177,8 \text{ vars}$

Conclusion

Dans le présent chapitre, les effets et les règles qui s'appliquent à la pollution des harmoniques qui se propagent dans les réseaux électriques. Lorsque l'onde de la tension d'alimentation n'est plus sinusoïdale, il y a présence d'harmoniques. Cette pollution est principalement causée par la présence croissante des convertisseurs statiques qui constituent des charges non linéaires. Les dommages causés par la présence des harmoniques peuvent être plus ou moins importants selon la configuration du réseau et les équipements présents. Différentes normes existent afin d'établir les limites tolérables du taux de distorsion harmoniques sur les réseaux. Dans le chapitre suivant, sera exposé les normes internationales reconnues pour fixer la qualité de l'énergie électrique, du côté basse tension et hautes tension.

CHAPITRE III

Normes et Réglementations de la Qualité de l'Énergie Électrique

Chapitre III : Normes et réglementations de la qualité de l'énergie électrique

III.1 Introduction

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les autres charges connectées au réseau et en même temps éviter la modification des caractéristiques de ce dernier, les distributeurs d'énergie électrique ont été amenés à émettre des recommandations. Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique dans le but d'épargner à l'utilisateur de l'énergie électrique, les désagréments engendrés par la présence des harmoniques ainsi, d'assurer la longévité et la sécurité des différents équipements constituant le réseau et ceux qui sont branchés à ce dernier.

Des normes fixant un seuil d'injection harmonique maximale à ne pas dépasser, ces normes ont été élaborées par différents organismes, ils peuvent être soit nationaux, notamment UTE-CEF (Union Technique de l'Electricité- Comité Electrotechnique Français), régionaux, notamment le CENELEC (Comité de normalisation Electrotechnique(EN 50160)) en Europe ou internationaux, notamment CEI (Comité Electrotechnique International).

III.2 Règles générales de conception d'une installation électrique

III.2.1 CEM : Compatibilité Électromagnétique

Quelques règles de base doivent être appliquées pour assurer la Compatibilité Électromagnétique. La non observation de ces règles peut avoir de graves conséquences lors de l'exploitation de l'installation électrique : perturbation des systèmes de communication, déclenchement intempestif des dispositifs de protection voire même destruction d'équipements sensibles. Dans la plupart des pays, les installations électriques doivent répondre à un ensemble de réglementations nationales ou établies par des organismes privés agréés. Il est essentiel de prendre en considération ces contraintes locales avant de démarrer la conception de l'installation.

III.2.2 Taux de distorsion en tension

Les niveaux tolérables pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension sont détaillés dans le tableau ci-dessous (CEI 61000-2-1 et 61000-2-2). Les valeurs sont exprimées en pourcentage de la tension fondamentale à 50 Hz.

Le tableau 3.1, repris de la norme CEI 61000-2-2, présente les caractéristiques et le niveau de compatibilité pour les harmoniques au point de raccordement du client pour un réseau satisfaisant la norme CEI 1000-2-4. Le taux global de distorsion en BT doit ainsi rester inférieur à 8%.

Harmoniques impairs Non multiples de 3		Harmoniques impairs Multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang h	Taux %	Rang h	Taux %	Rang h	Taux %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,2	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21		10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+0,5*25/h				

Tableau 3.1 : Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-2-1 et CEI 61000-2-2)

III.2.3 Taux de distorsion en courant

Limitation des harmoniques de courant produits par les appareils : La norme CEI 61000-3-2 impose des limites à tous les matériels appelant un courant inférieur ou égal à 16A par phase exceptés les matériels de puissance inférieure à 50W.

III.3 Définition des plages de tensions [7]

a. Tensions normalisées entre 100 V et 1000 V (CEI 60038 Édition 6.2 2002-07)

La tension nominale des réseaux existants à 220/380 V et à 240/415 V doit évoluer vers la valeur recommandée 230/400 V. Il convient que la période de transition soit la plus brève possible. Au cours de cette période, comme première étape, il est recommandé que les distributeurs d'électricité des pays ayant des réseaux à 220/380 V ramènent la tension dans la plage 230/400 V +6 %, -10 % et ceux des pays ayant des réseaux à 240/415 V ramènent la tension dans la plage 230/400 V +10 %, -6 %. A la fin de cette période de transition, il convient que la tolérance de 230/400 V ± 10 % soit atteinte; après cela la réduction de cette plage sera prise en considération. Toutes ces considérations s'appliquent aussi à la valeur actuelle 380/600 V par rapport à la valeur recommandée 400/690 V.

b. Tensions normalisées au dessus de 1 kV, ne dépassant pas 35 kV (CEI 60038 Édition 6.2 2002-07)

Ces réseaux sont en général des réseaux à trois fils, sauf indication contraire. Les valeurs indiquées désignent la tension entre phases. Les valeurs indiquées entre parenthèses doivent être considérées comme non préférentielles. Il est recommandé de ne pas utiliser ces valeurs pour les nouveaux réseaux à établir à l'avenir.

Note 1: Il est recommandé que, dans un même pays, le rapport entre deux tensions nominales successives ne soit pas inférieur à deux.

Note 2: Dans un réseau normal de série I, la tension la plus élevée et la tension la plus basse ne diffèrent pas de plus de $\pm 10\%$ approximativement de la tension nominale du réseau. Dans un réseau normal de la série II, la tension la plus élevée ne diffère pas de plus de $+5\%$ et la tension la plus basse ne diffère pas de plus de -10% de la tension nominale du réseau. (1) Ces valeurs ne devraient pas être utilisées pour les réseaux de distribution publique. (2) Ces réseaux sont en général à quatre fils. (3) L'unification de ces valeurs est à l'étude.

Harmoniques impairs		Harmoniques pairs	
Rang harmonique n	Courant maxi. Admissible (A)	Rang harmonique n	courant maxi. Admissible (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,30
9	0,40	$6 < n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$
11	0,33		
13	0,21		
$13 < n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$		

Tableau 3.2 : Niveau de compatibilité pour les courants harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme CEI 61000-3-2)

Conclusion

Afin de limiter les effets des perturbations harmoniques sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et l'IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série CEI 61000 et l'IEEE Standard 519 [5].

De façon générale ces normes identifient les principales sources de pollution harmonique, décrivent les effets de ces harmoniques sur les réseaux, décrivent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques et fournissent diverses recommandations en vue de réduire la présence d'harmoniques sur les réseaux électriques. Dans le présent projet, la norme IEEE Standard 519-1996 (Annexe C) sera utilisée.

CHAPITRE IV

Moyens de Mitigation Contre la Pollution Harmonique

Chapitre IV : Moyens de mitigation contre la pollution harmonique

IV.1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique est un indicateur de la santé des équipements électriques branchés sur le réseau. La santé des équipements (bon fonctionnement, défaillance, durée de vie, etc.) est affectée directement par la qualité du réseau à l'intérieur du bâtiment et surtout de la tension disponible sur chacune des prises électriques. Cependant, garder une bonne qualité de l'énergie c'est équivalent à protéger ces équipements contre l'environnement des pollutions.

Plusieurs techniques sont actuellement disponibles pour aider à améliorer la qualité de l'énergie. Si les équipements sont déjà installés, comment améliorer la qualité et éviter les problèmes? Ajouter le critère qualité de l'énergie au départ, et ceci avant d'arrêter le choix et par la suite l'acquisition de l'équipement. Il ne faut pas oublier que la meilleure technique de protection est à la source.

IV.2 Remèdes théoriques et pratiques pour améliorer le facteur de puissance

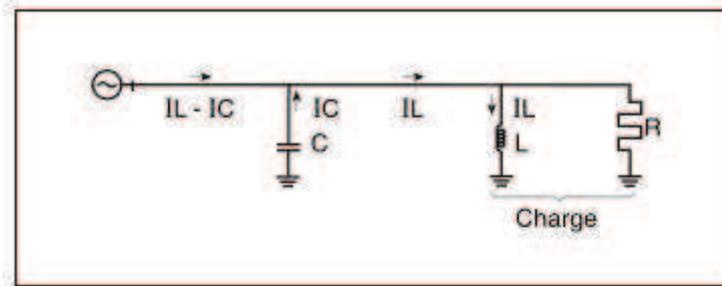
Améliorer le facteur de puissance d'une installation consiste à installer une batterie de condensateurs qui agit en tant que source d'énergie réactive. Cette disposition s'appelle la compensation de l'énergie réactive de l'installation.

Une charge inductive avec un facteur de puissance de faible valeur nécessite que le réseau en amont, les génératrices et le réseau de transport, lui fournissent un courant réactif inductif (en retard de 90° par rapport au système de tensions) ce qui génère, voir la partie facteur de puissance et puissance réactive, des pertes en ligne et des chutes de tension importantes.

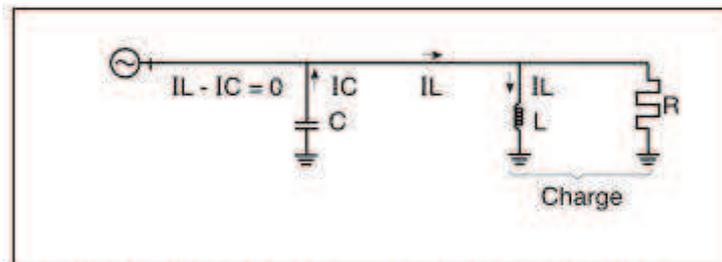
Si une batterie de condensateurs est installée en parallèle sur la charge, son courant réactif (capacitif) suivra le même chemin que le courant réactif (inductif) de la charge dans le réseau en amont : les 2 courants s'additionnent dans le réseau amont. Comme indiqué dans la partie Puissance réactive des condensateurs, le courant capacitif I_c (qui est en avance de 90° par rapport au système de tensions) de la batterie de condensateurs est en opposition de phase avec le courant inductif I_L (qui est en retard de 90° par rapport au système de tension) et, par suite, les 2 courants s'additionnant dans le réseau amont l'intensité du courant réactif amont résultant sera fortement réduit voir annulé si les courants I_c et I_L sont égaux ($I_c = I_L$). Les figures [a] et [b] indiquent la circulation des composantes réactives des courants dont :

- R représente la somme des composantes actives des charges,
- L représente la somme des composantes réactives (inductives) des charges,
- C représente la composante réactive (capacitive) de la batterie de condensateurs de compensation.

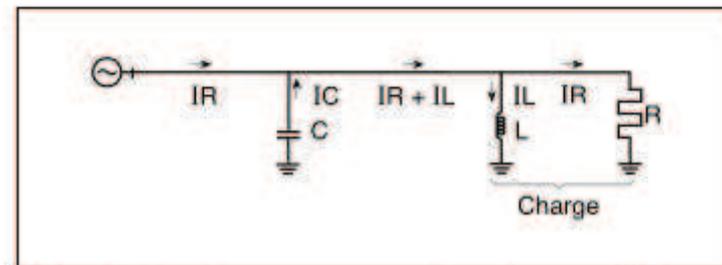
Comme l'indique le schéma [b] de la figure 4.1, la batterie de condensateurs semble fournir toute l'énergie réactive à la charge. Dans le schéma [c] de la figure 4.1, la composante active du courant a été ajoutée et montre une charge entièrement compensée ayant un facteur de puissance égal à 1. En général il n'est pas économique de compenser entièrement une installation.



[a] Circulation des composantes réactives des courants



[b] Si $I_C = I_L$, toute la puissance réactive est fournie par la batterie de condensateurs



[c] cas b) avec la composante active du courant de charge

Figure 4.1 : Modifications des courants consécutives à l'amélioration du facteur de puissance

La figure 4.1 reprend le diagramme de la figure L2 pour illustrer le principe de compensation partielle par réduction de la puissance réactive importante Q d'une installation à une valeur plus faible Q' au moyen d'une batterie de condensateurs de puissance réactive Q_c . Par suite, la valeur de la puissance apparente de l'installation S a été réduite à la valeur S' .

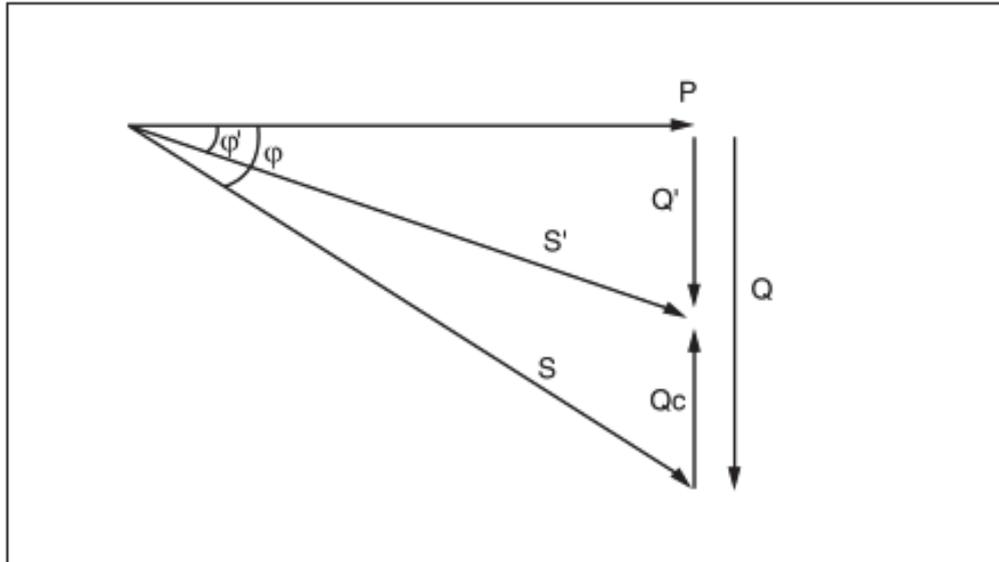


Figure 4.2 : Schéma de principe de la compensation : $Q_c = P (\tan \varphi - \tan \varphi')$

Exemple :

Un moteur consomme 100 kW avec un facteur de puissance de 0,75 (c'est-à-dire $\tan \varphi = 0,88$). Pour augmenter le facteur de puissance à 0,93 (c'est-à-dire $\tan \varphi = 0,4$), la puissance réactive de la batterie de condensateurs doit être :

$$Q_c = 100 (0,88 - 0,4) = 48 \text{ kvar.}$$

Le niveau de compensation à choisir et le dimensionnement de la batterie de condensateurs dépendent des particularités de l'installation.

IV.3 Solutions pour la compensation de la puissance réactive

IV.3.1 Compensation globale

Lorsque la charge est stable et continue, une compensation globale convient. Dans ce cas, la batterie est raccordée en tête d'installation BT et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. La batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation (figure 3.a).

Parmi les Intérêts et avantages de compensation globale :

- Le foisonnement naturel de l'installation entraîne un dimensionnement faible de la batterie et un nombre élevé d'heures de fonctionnement. Elles sont donc amorties encore plus rapidement.
- Supprime les facturations complémentaires pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : tarif vert),
- Diminue la puissance apparente (ou appelée) en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation (exemple : tarif jaune),
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW).

IV.3.2 Compensation partielle

Une compensation partielle est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents. La batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être

réalisée (Figure. 3.b). Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment au niveau du dimensionnement des câbles d'arrivée du ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée.

La compensation partielle de l'installation a pour avantages :

- Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive,
- Réduit la puissance apparente d'utilisation (en kVA), calculée habituellement à partir des charges installées,
- Soulage le transformateur d'alimentation, ce qui permet d'alimenter des charges supplémentaires si nécessaire,
- Permet de réduire la section des câbles d'arrivée du tableau de distribution intermédiaire ou d'ajouter des charges supplémentaires,
- Réduit les pertes en ligne dans ces mêmes câbles.

IV.3.3 Compensation individuelle

Une compensation individuelle est à envisager dès que la puissance du récepteur (en particulier d'un moteur) est significative par rapport à la puissance de l'installation. La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement un moteur, voir (Compensation des moteurs asynchrones). La compensation individuelle est à considérer quand la puissance du moteur est significative par rapport à la puissance souscrite de l'installation [3]. Le dimensionnement en kvar de la batterie de condensateurs est de l'ordre de 25% de la puissance nominale (kW) du moteur. Une compensation complémentaire en tête de l'installation (transformateur) peut être aussi économiquement intéressante.

La compensation individuelle de l'installation a pour avantages :

- Réduction des pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive,
- Réduction de la puissance apparente consommée (en kVA),
- Réduction de la section des câbles et les pertes en ligne.

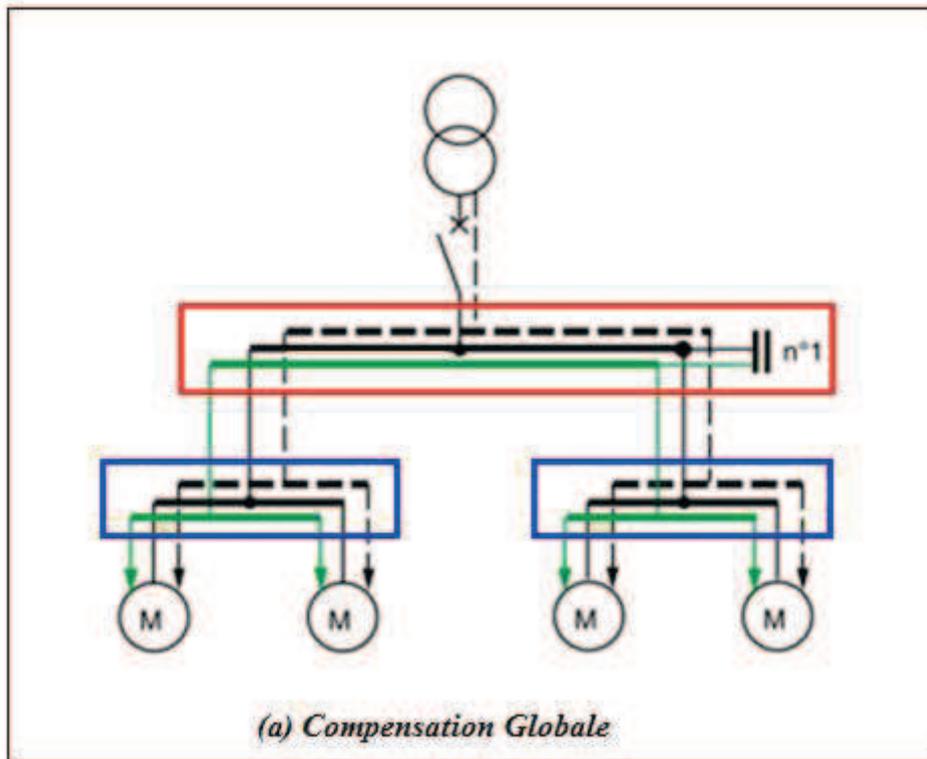


Figure 4.3.a : Principe de compensation globale

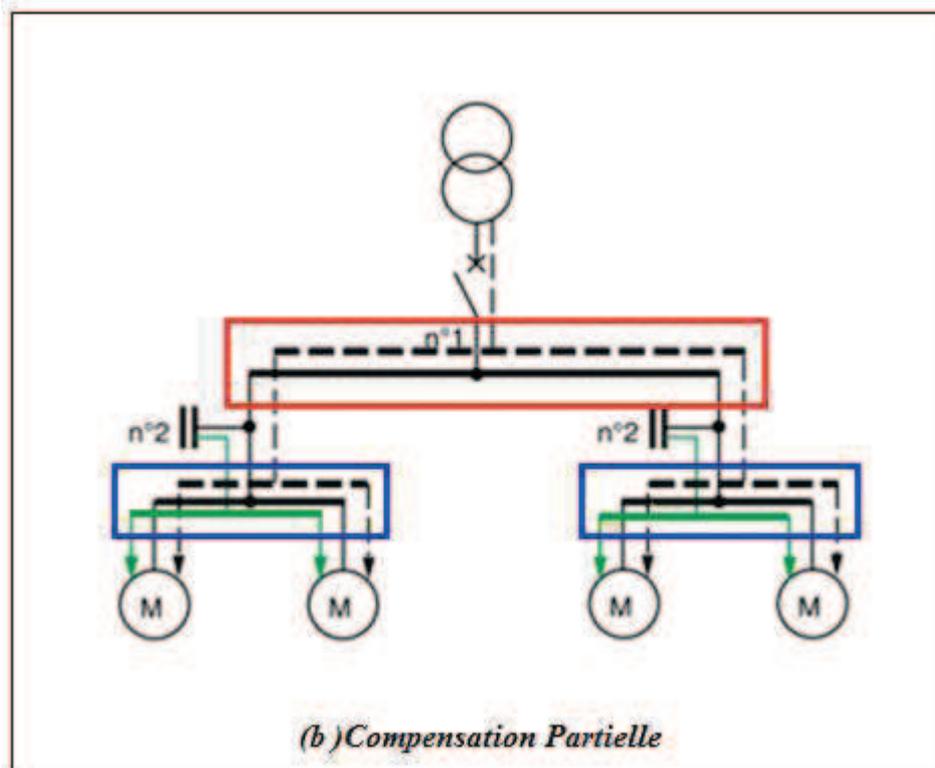


Figure 4.3.b : Principe de compensation partielle

IV.4 Solutions de filtrage passif de la pollution harmoniques

De nombreuses solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles et le réseau vis-à-vis de la pollution harmonique. La solution la plus fréquemment mise en œuvre est le filtrage passif des harmoniques. Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à éliminer les tensions harmoniques y afférentes. Des éléments capacitifs et inductifs sont, en effet, associés de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie. Une connaissance précise des rangs harmoniques devant être filtrés et des atténuations requises est nécessaire à la réalisation d'un filtre.

IV.4.1 Filtres passifs

En fonction de l'atténuation harmonique recherchée, différents types de filtres passifs sont utilisés. Ils peuvent être classifiés selon leur emplacement, leur mode de connexion au circuit principal, leur degré d'amortissement ainsi que les fréquences de leurs résonances. On distingue généralement un filtre shunt et un filtre série. Par ailleurs, le filtre shunt est utilisé exclusivement du côté courant alternatif pour les raisons suivantes:

- Le filtre série peut porter le courant en entier à partir du circuit principal et doit être isolé de la terre. Le filtre shunt, par contre, porte uniquement le courant harmonique et peut être lié à la terre à l'une des extrémités.
- A la fréquence fondamentale, un filtre shunt qui a l'avantage de fournir de la puissance réactive alors qu'un filtre série consomme de la puissance réactive.
- Pour des performances égales, un filtre shunt est beaucoup moins cher qu'un filtre série.

Dans ce sens, on s'intéresse à l'étude de filtres passifs de type shunt (ou filtres parallèles) dont les différents types pouvant être rencontrés sont:

1. L'inductance anti-harmonique
2. Le filtre résonant
3. Le filtre amorti.

IV.4.2 Différents types de filtres passifs parallèles

a. Inductance anti-harmonique

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée comme est montrée dans la figure 4.4.

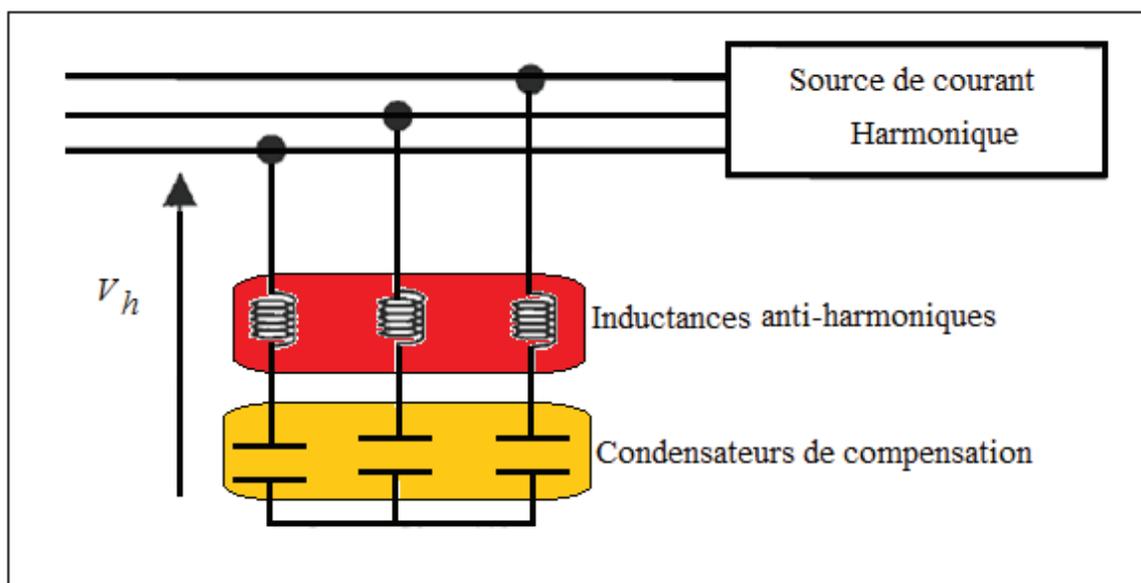


Figure 4.4: Raccordement d'une inductance anti-harmonique

Ce type de filtre a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau, vues du point d'injection au voisinage de la fréquence d'accord et donc les tensions harmoniques sur le réseau.

Pour éviter que ce filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel ils sont raccordés, on les accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique.

A noter aussi que l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à la fréquence fondamentale aux bornes des condensateurs qui doivent donc être dimensionnés en conséquence.

b. Filtre résonant

Un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé. Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé; l'accord du filtre est donc très pointu. Plusieurs filtres résonants correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer, sont souvent installés, en parallèle.

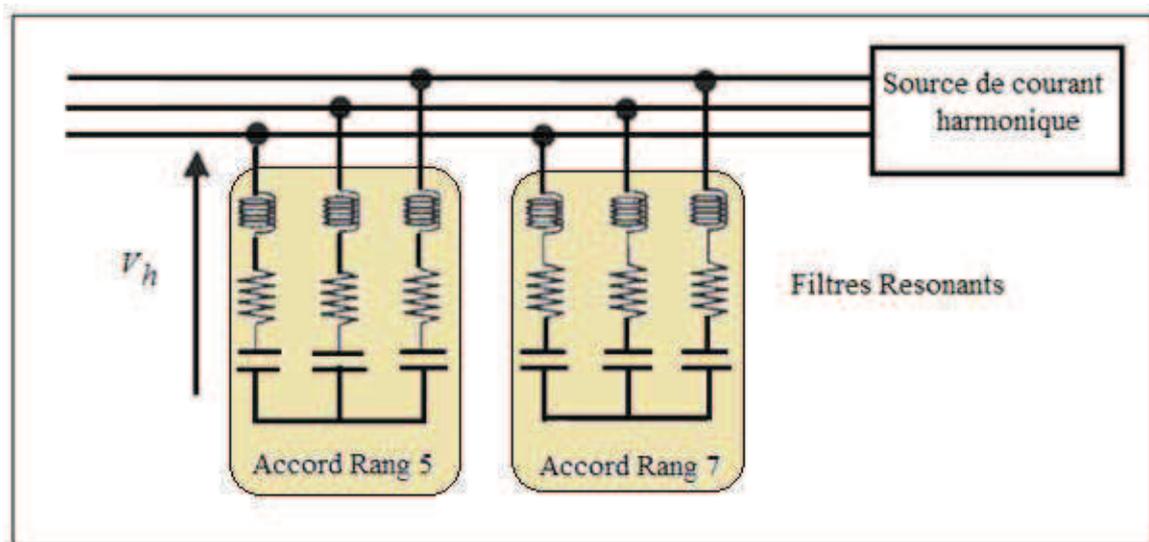


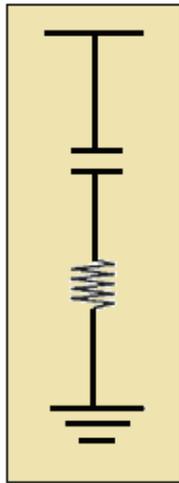
Figure 4.5: Installations de filtres résonants

La puissance réactive nécessaire pour l'installation est répartie entre condensateurs des différents filtres. Ceci nécessite une étude fine du profil de charge de l'installation. Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (dus à la qualité de réalisation) ou de la capacité (dus au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble. Cette dérive est plus marquée pour les filtres utilisant des condensateurs de faible capacité. Afin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage.

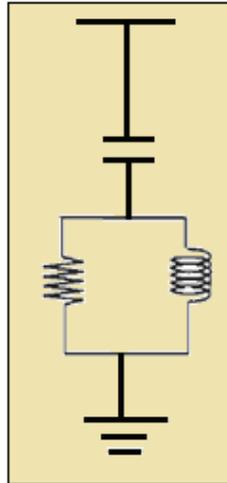
c. Filtre amorti

On distingue trois types de filtres amortis tels qu'illustrés en figure 4.6 :

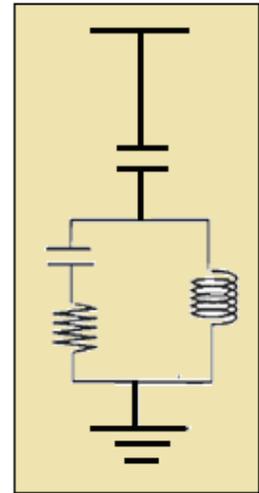
- a. un filtre amorti de premier ordre,
- b. un filtre amorti de second ordre,
- c. un filtre de troisième ordre.



a: Filtre du 1^{er} ordre



b: Filtre du 2^{eme} ordre



c: Filtre du 3^{eme} ordre

Figure 4.6 : Filtres amortis passe-haut

Le filtre de premier ordre exige une grande capacité et présente une perte de puissance excessive à la fréquence fondamentale. Les filtres de second ordre et d'ordre 3 sont couramment utilisés. Tous les deux sont en général conçus avec un faible facteur de qualité Fq compris entre 0,7 et 1,4.

Un filtre amorti de second ordre se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance (figure 4.6.b) appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas élevées pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre; c'est un filtre passe-haut de deuxième ordre.

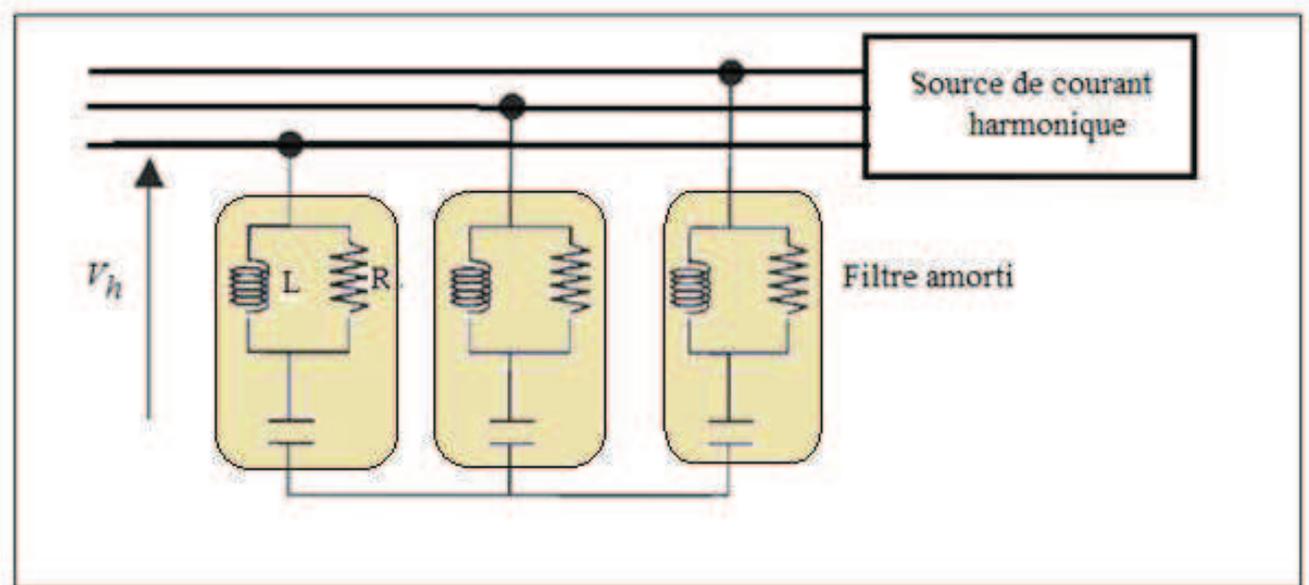


Figure 4.7 : Installation d'un filtre amorti

En pratique, il est courant de mettre en œuvre :

1. des filtres résonants accordés sur les premiers rangs harmoniques (rangs 5 et 7) où les injections de courant sont importantes.
2. Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le reste du spectre (rangs > 11).
3. L'anti-résonance des filtres provoque une amplification des rangs harmoniques inférieurs à la fréquence d'accord. Le premier filtre est alors accordé sur la première fréquence d'injection de façon à ne pas faire coïncider la fréquence d'anti-résonance avec une injection de courant.

Il est important de prévoir une inductance ajustable afin d'accorder correctement le filtre; ce, en raison des tolérances sur les valeurs des condensateurs et de l'inductance dont l'effet peut être très important sur l'efficacité du filtre.

IV.5 Avantages et inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif a déjà largement fait ses preuves dans le milieu industriel grâce à son coût faible, son efficacité et son adaptation pour des réseaux de forte puissance. Il présente cependant les inconvénients suivants:

- La présence sur un même réseau de deux filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, mais en pratique légèrement différent, provoque entre eux la circulation de courants harmoniques très importants qui provoque rapidement leur destruction. Ce cas se rencontre facilement en raison du fait que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des éléments du filtre. Il faut absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau.
- La mise en parallèle d'un filtre anti-harmonique et d'une batterie de condensateurs provoque une contrainte pouvant amener la destruction des condensateurs.
- Lorsqu'il y a plusieurs rangs harmoniques à filtrer, il est nécessaire de mettre autant de filtres accordés sur les rangs correspondants. Ce problème peut être résolu en adoptant un filtre à large bande qui atténue plusieurs rangs harmoniques; ce avec un facteur d'atténuation moindre.
- L'implantation de filtres passifs sur un réseau nécessite une étude poussée et précise. En outre, il n'est pas toujours possible de connaître tous les paramètres du réseau, nécessaire à l'étude, lorsqu'il est de grande dimension.
- Finalement, l'amortissement de la résonance dans les systèmes de puissance par les filtres passifs peut introduire des résonances additionnelles indésirables pouvant conduire à la destruction de ces filtres. L'amortissement utilisant la commande et l'électronique de puissance se présente comme solution pour améliorer efficacement le mode opératoire du réseau.

IV.6 Désavantages du filtrage passif

- Compensation fixe,
- Volumineux,
- Risque de résonance à tout moment.

4.3 Etude et dimensionnement des filtres passifs

Deux types de filtres sont couramment utilisés en l'occurrence ; le filtre résonant avec un facteur de qualité Fq élevé, est accordé sur les fréquences harmoniques de rangs réduits comme le 5^{ème} et le 7^{ème} harmonique et le filtre amorti avec un facteur de qualité Fq faible, offre une impédance faible dans une bande de fréquences embrassant, par exemple le 1^{ème} et les rangs harmoniques élevés, d'où l'appellation de filtre passe-haut.

Le coût des filtres en alimentation alternative est suffisamment élevé pour justifier une conception précise. Le coût des filtres peut être partiellement destiné à la puissance réactive et partiellement au filtrage harmonique, cependant il n'existe aucune base logique de la division. Par l'installation des filtres passifs, deux objectifs sont visés:

1. Réduire les tensions et les courants harmoniques dans les réseaux alternatifs à des niveaux acceptables,
2. Fournir tout ou une partie de la puissance réactive consommée. Il faut donc concevoir un filtre minimum; autrement dit un filtre qui supprime adéquatement les harmoniques à un coût minimal et qui fournit de la puissance réactive (pas nécessairement toute la puissance requise).

IV.7 Méthode de dimensionnement d'un filtre passif parallèle

4.3.1 Conception d'un filtre résonant simple

La méthode de dimensionnement présentée dans le paragraphe suivant respecte ce compromis, dont lequel, le filtre en question supprime adéquatement les harmoniques à un coût minimal et aussi fournit de la puissance réactive et est extraite de la référence. Un filtre résonant simple est un circuit $R-L-C$ série accordé sur la fréquence d'un seul harmonique (figure 1.7). Son impédance Z_f est donnée par :

$$Z_f = R_f + j \left(L_f - \frac{1}{C_f \cdot W} \right) \quad (4.1)$$

Où:

R_f est la résistance du filtre

L_f est l'inductance du filtre (F) ;

C_f est la capacité du filtre (F) ;

W est la pulsation du réseau;

A sa fréquence de résonance, son impédance est une résistance R de valeur relativement faible.

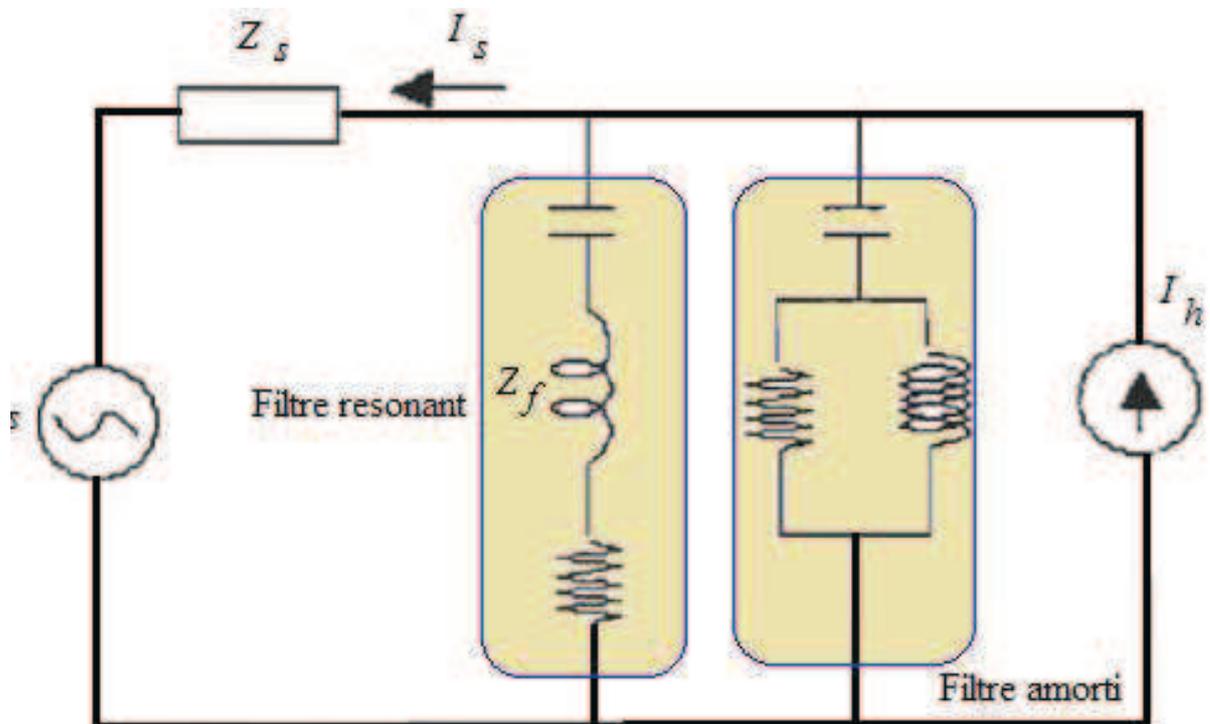


Figure 4. 8 : Schéma monophasé d'un réseau avec un filtre résonant et amorti

$$W_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} ; \text{ Fréquence angulaire d'accord (rad/sec)}$$

$$\delta = \frac{W - W_n}{W_n} ; \text{ Déviation de la fréquence \% à la fréquence de résonance}$$

$$X_0 = L \cdot W_n = \frac{1}{C \cdot W_n} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.2)$$

X_0 ; Représente la réactance de l'inductance ou de la capacité à la fréquence d'accord;

$$F_q = \frac{X_0}{R} ; \text{ Facteur de qualité de l'inductance ou d' accord du filtre.}$$

$$W = W_n(1 + \delta) \quad (4.3)$$

$$C = \frac{1}{W_n \cdot X_0} = \frac{1}{W_n \cdot R \cdot F_q} \quad (4.4)$$

$$L = \frac{X_0}{W_n} = \frac{R \cdot F_q}{W_n} \quad (4.5)$$

La substitution de ces équations dans l'équation (2.1) donne:

$$Z_f = R \cdot \left(1 + j \cdot F_q \cdot \delta \cdot \frac{2+\delta}{1+\delta}\right) \quad (4.6)$$

Pour de faibles déviations de fréquence, l'impédance est donnée d'une manière très rapprochée par :

$$Z_F \cong R(1 + j \cdot 2\delta \cdot F_q) = X_0 \cdot \left(\frac{1}{F_q} + 2 \cdot j \cdot \delta\right) \quad (4.7)$$

$$|Z_F| \cong R \cdot \sqrt{1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2} = X_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{F_q^2} + 4\delta^2} \quad (4.8)$$

Sous de telles conditions, l'admittance, la conductance et la susceptance du filtre sont données par :

$$Y_F \cong \frac{1}{R(1 + j \cdot 2\delta \cdot F_q)} = \frac{1 - j \cdot 2\delta \cdot F_q}{R \cdot (1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2)}$$

$$= \frac{F_q - j \cdot 2\delta \cdot F_q^2}{X_0 \cdot (1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2)} \quad (4.9)$$

$$|Y_F| \cong \frac{1}{R \cdot \left(\sqrt{1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2} \right)} = \frac{F_q}{X_0 \cdot \sqrt{(1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2)}} \quad (4.10)$$

$$G_F \cong \frac{1}{R \cdot (1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2)} = \frac{F_q}{X_0 (1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2)} \quad (4.11)$$

$$B_F \cong \frac{2\delta \cdot F_q}{R \cdot (1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2)} = \frac{2\delta \cdot F_q^2}{X_0 \cdot (1 + 4\delta^2 \cdot F_q^2)} \quad (4.12)$$

a. Cas de la déviation de la fréquence :

Dans la pratique, le filtre n'est pas toujours accordé exactement sur la fréquence de l'harmonique à supprimer. La fréquence du réseau à courant alternatif peut changer; ce qui cause un changement proportionnel de la fréquence harmonique. Aussi, l'inductance et la capacité peuvent changer à cause du changement de la température ambiante, etc... Les changements de L et de C de 2% causent la même atténuation que le changement de la fréquence du réseau de 1% [3]. Le désaccord total ou la déviation de la fréquence équivalente est donnée par l'équation suivante :

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (4.13)$$

b. Minimisation de la tension harmonique V_h :

Il s'agit de minimiser, non l'impédance du filtre Z_{hF} seule, mais l'impédance Z_h résultant de la combinaison parallèle de l'impédance du filtre Z_{hF} et de l'impédance Z_{hs} du réseau à courant alternatif:

$$V_h = |Z_h| \cdot I_{hs} = \frac{|I_{hs}|}{|Y_{hs}|} = \frac{|I_{hs}|}{|Y_{hF} + Y_{hs}|} \quad (4.14)$$

où:

I_{hs} ; est le courant harmonique de rang h du côté de la source du réseau;

Y_{hF} ; est l'admittance du filtre;

Y_{hs} ; est l'admittance du réseau;

Y_h ; est l'admittance équivalente de la mise en parallèle de Y_{hF} et Y_{hs} .

Les variables qui ne sont pas sous le contrôle du concepteur du filtre sont choisies avec pessimisme pour avoir V_h maximale; ensuite les variables sous contrôle sont choisies de manière optimale pour donner à V_h une valeur acceptable. Les variables auxquelles des valeurs pessimistes sont attribuées sont :

- * La déviation de fréquence: δ (la tension harmonique augmente avec δ), sa valeur maximale est notée δ_{max} •
- * L'impédance du réseau: Z_{hS} .

C'est une valeur optimale de Fq qui donne une tension harmonique minimale pour des conditions fixées du réseau, cette valeur est dénotée par Fq_0 . Puisque Fq_0 dépend de l'impédance du réseau qui est susceptible de varier, plusieurs cas doivent être examinés.

IV.8 Exemple d'installation des filtres passifs



6 fois 60kVAR, 600 Volt installation du
Bâtiment A- ETS



Exemple d'une installation de 13 MVAR
Batteries de condensateurs pour 320 KV/120kV/25KV
réseau de distribution

Figure 4.9 : Exemple d'installation de filtres passifs

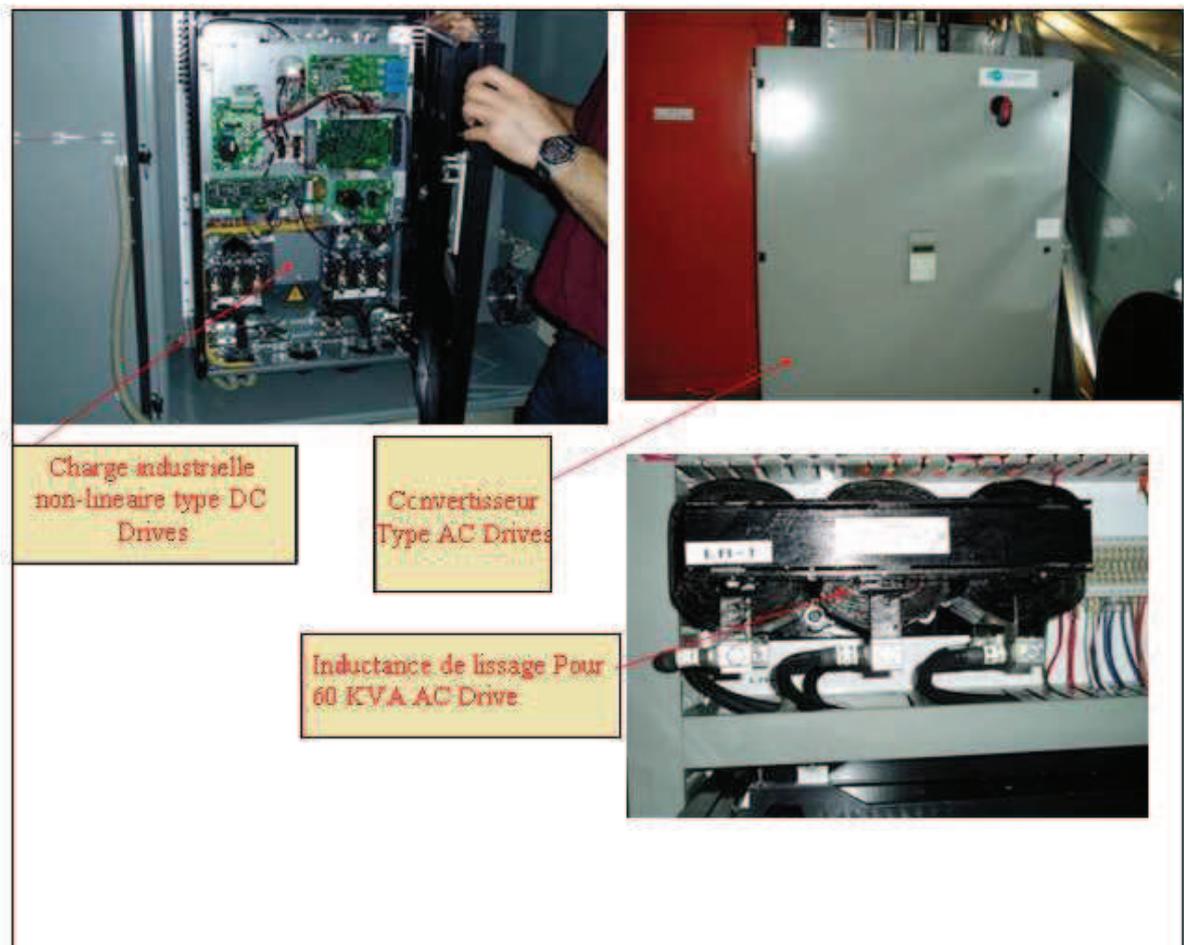


Figure4.10 : Charge non-linéaire, convertisseurs statiques



ABB- ACF-600 Air conditionné 45 KVA Drive



Grahame contrôleur pour 60 KVA HVAC Drive

Figure 4.11 : Charge non-linéaire active

Conclusion

Il est nécessaire de procéder au filtrage des harmoniques, comme moyen de mitigation et ce, pour traiter les anomalies suivantes :

- Dégradation de la qualité de l'énergie
- Pertes additionnelles, surchauffe
- Surtension récurrente
- Mal fonctionnement et des équipements électroniques sensibles,
- Vibrations mécanique dans les systèmes électromécaniques
- Déclenchement des disjoncteurs, brûler les fusibles de protection
- Problème de résonance avec les condensateurs de compensation de la puissance réactive déjà installé
- Il faut respecter les normes sur les
- Harmoniques standards
- Limitation de la tension harmonique
- Limitation du courant harmonique

Ces normes sont souvent faites par les fournisseurs d'énergie. Pour le réseau à l'intérieur des bâtiments il faut appliquer des normes plus strictes.

CHAPITRE V

Compensation par Filtrés Actifs et les Tendances Technologiques

Chapitre V : Compensation par Filtres Actifs et les Tendances Technologiques

V.1 Introduction

La technologie des filtres actifs est maintenant mature pour être utilisée comme élément de compensation dans les bâtiments et industries où la qualité de l'énergie est en question. Cette technologie s'est beaucoup améliorée depuis un quart de siècle avec l'arrivée sur le marché de plusieurs configurations et techniques de contrôle. Cette technologie est utilisée pour éliminer les harmoniques, réguler la tension, éliminer le papillotement de la tension, éliminer le déséquilibre de la tension. Ce plus grand nombre d'objectifs sont atteints soit individuellement ou bien en combinaison dépendamment du besoin du client (le choix de la stratégie de contrôle, la topologie, le nombre de conducteurs, etc.)

V.2 La technologie des filtres actifs

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour compenser les harmoniques dans les systèmes de puissance industriels depuis le principe de compensation de base proposé en 1971 par Sasaki et Machida [8]. En plus de la technologie de commande (*MLI*) [i.e. modulation de largeur d'impulsion] sophistiquée, le développement de l'étude théorique a rendu possible leur mise au stade de test pratique. En 1990, le filtre actif (a *MLI*) a connu un regain d'intérêt. Ses performances de compensation harmonique sont supérieures à celles du filtre passif classique.

V.2.1 Principe de base des filtres actifs

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, qui injectent en série ou en parallèle sur les réseaux des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations harmoniques existantes.

Les convertisseurs de puissance totalement commandables utilisent un GTO, IGBT ou un MOSFET comme organe de réglage en vue d'asservir l'évolution de certaines grandeurs relatives au générateur ou au récepteur. Ces interrupteurs sont à amorçage et blocage commandés. L'utilisation de réseaux de commutation avec les thyristors classiques limite la fréquence de l'onduleur à environ 100 Hz. Les thyristors interruptibles par la gâchette étendent la fréquence jusqu'à environ 2 kHz, le transistor bipolaire à 10 kHz et le transistor MOS de puissance à 25 kHz.

La principale raison de l'utilisation de dispositifs de commutation rapides est de pouvoir commander l'onduleur par modulation de largeur d'impulsions. Plus on effectue des commutations par période, plus on élimine les harmoniques de rangs supérieurs.

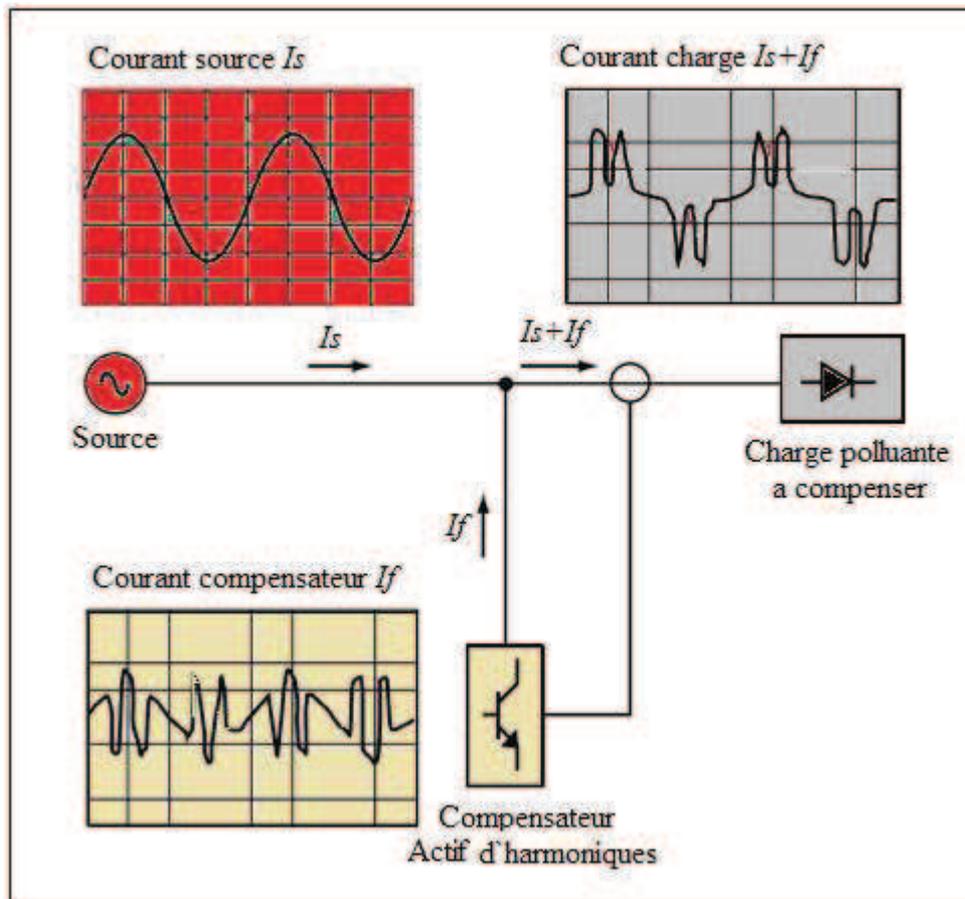


Figure 5.1 : Principe de mise en œuvre du compensateur actif



Figure 5.2 : Un exemple d'un filtre actif de 60 Ampères

V.2.2 La qualité de l'énergie électrique sur le réseau monophasé

Les charges monophasés comme: éclairage, fours, Écrans - TVs, Ordinateurs, imprimantes, photocopieuses, climatisation, agissent comme des charges non linéaires et absorbent un courant non sinusoïdal ce qui détériore la qualité de l'énergie. Cependant, une installation dédiée pour les ordinateurs, et autres charges monophasées polluantes doit être:

- Compensée en termes de tension (V_{min} et V_{max})
- Protéger contre les variations de la ligne (surtension, creux, etc.)
- Découplée et isolée des autres charges et pour minimiser l'interaction via la tension d'alimentation
- Isolateur galvaniquement avec écran électrostatique
- Bien mise à la terre

Les nouveaux semi-conducteurs de puissance tels que :

- Thyristors, BJTs et power MOSFETs on
- Later, SITs and GTOs ont tout début été utilisés.

Avec l'arrivée du composant IGBTs le problème du filtre est réglé pour les applications à moyenne puissance avec de hautes fréquences de commutation. Ainsi, la qualité des capteurs développés à base de (Integrated electronics) à améliorer ses performances.

V.3 La structure des filtres actifs

La structure des filtres actifs se compose essentiellement de deux parties, soit d'une partie puissance et d'une partie commande (figure 5.2 et 5.3). La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi-conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Au moyen de stratégies de contrôle appropriées, il est possible de générer des signaux harmoniques à la sortie de l'onduleur servant à compenser ceux présents sur le réseau électrique.

a) Élément de stockage

La sélection de l'élément de stockage (C ou L) servant de source d'alimentation de l'onduleur en tension ou en courant est désigné de façon que le filtre actif soit capable de suivre sa référence. La source d'énergie doit être dimensionnée de manière à ce que la tension ou le courant qu'elle génère contient une fluctuation acceptable.

b) Type de semi-conducteurs utilisés

Les semi-conducteurs utilisés par l'onduleur sont caractérisés par leur aptitude à supporter une tension et un courant maximal. Le dimensionnement de ces grandeurs dépend des circuits des deux côtés de l'onduleur (continu et alternatif), car ces derniers imposent les tensions et les courants des interrupteurs [5].

Il est à noter que les thyristors classiques avec le circuit auxiliaire d'extinction ne sont plus très utilisés, on leur préfère ceux que l'on peut commander en ouverture et en fermeture comme les MOSFET, les IGBT et les GTO. Dépendamment de l'utilisation requise, le MOSFET est utilisé pour les faibles puissances, le transistor bipolaire ou IGBT, pour les courants moyens et le thyristor GTO pour les grandes puissances.

L'onduleur de courant utilise des semi-conducteurs réversibles en tension et unipolaires en courant. L'intensité du courant qu'ils doivent supporter est limitée par la valeur du courant de court circuit % tandis que la tension qu'ils doivent supporter doit être au moins égale à celle de la ligne d'alimentation.

L'onduleur de tension utilise des semi-conducteurs réversibles en courant et unipolaires en tension. La tension que doivent supporter les semi-conducteurs composant l'onduleur de tension est limitée par la valeur V_c de la tension V_c . L'intensité du courant qu'ils doivent supporter est imposée par le

courant maximal généré par le filtre actif. Ils doivent être capables de supporter la valeur maximale du courant harmonique à compenser.

c) Filtrage des harmoniques générées par le découpage de l'onduleur

Le filtre actif doit être connecté au réseau de distribution à travers un filtre passif de découplage.

Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte de deux points importants :

1. Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif.
2. Il doit préserver les performances du filtre actif.

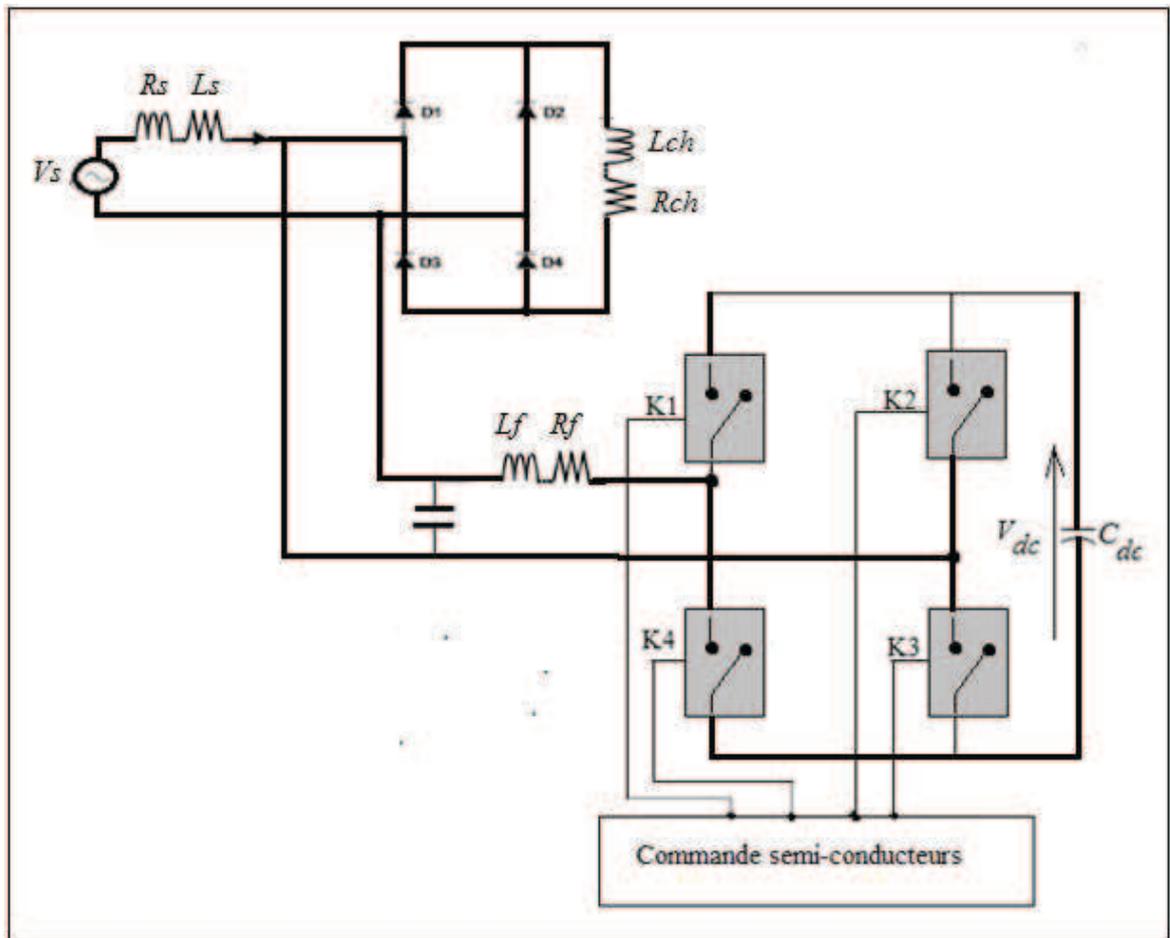


Figure 5.3 : Modèle d'un convertisseur à source de tension

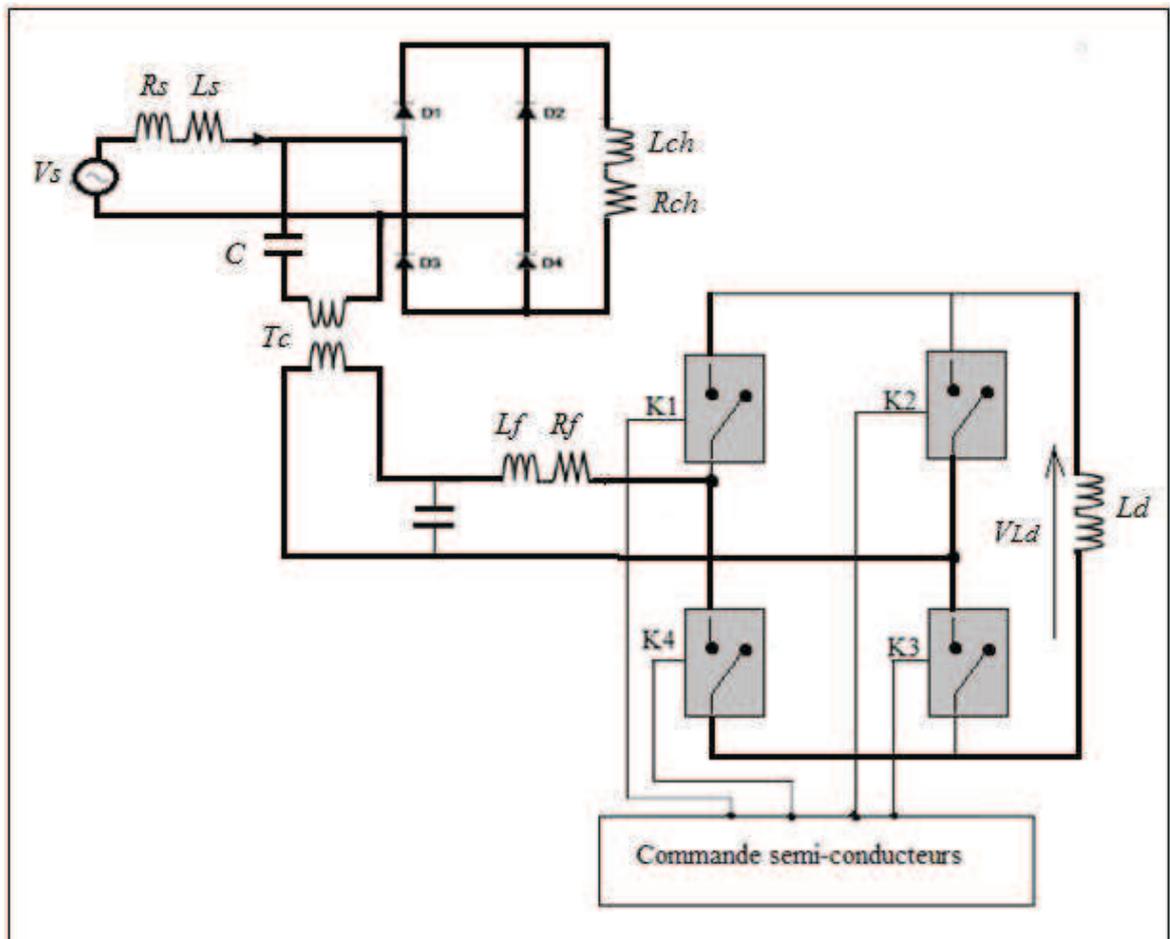


Figure 5.4 : Modèle d'un convertisseur à source de courant

Un système de filtrage pratique consiste en une combinaison d'un filtre actif (FA) et d'un filtre passe-haut de second ordre; une excellente performance de filtrage avec une faible fréquence de Commutation est ainsi obtenue. Le filtre actif supprime les harmoniques de rangs faibles, pendant que le filtre passe haut s'occupe du filtrage des harmoniques de rangs élevés dans les courants de la charge.

V.4 La qualité de l'énergie sur le réseau triphasé

Comme la majeure partie de l'énergie est consommée par des charges triphasées telles: Variateurs de vitesse avec une entrée redresseur à diodes, à thyristors ou dernièrement nous avons les redresseurs actif à IGBT. La grande majorité de redresseurs utilise les diodes éléments de redressement. Ces diodes imposent un spectre d'harmoniques proportionnel à la consommation énergétique.

Le facteur de déplacement est unitaire mais le facteur de puissance est mauvais variant de 0.56 à 0.9. La dernière technologie des redresseurs d'entrée est du type IGBT inclus la fonction correction du facteur de puissance et la compensation de l'énergie réactive. Ces convertisseurs peuvent être qualifiés d'intelligents s'ils sont munis d'un contrôleur approprié. Cependant, un filtre d'entrée est nécessaire pour augmenter l'impédance de ligne, lisser le courant et protéger le convertisseur.

Ces convertisseurs présentent les caractéristiques suivantes :

- Ils sont bidirectionnels en puissance
- Ils coûtent plus cher
- Technologie de l'avenir

V.5 Principales combinaisons et structures de filtres actifs

Différentes topologies de filtres actifs sont proposées dans la. Pour chaque variante interviennent des problèmes de caractéristiques nominales requises des composants semi-conducteurs, et de méthode de détermination des caractéristiques du compensateur pour les charges à compenser.

Le filtrage actif ou hybride est une solution intéressante, vue les caractéristiques suivantes :

- Dynamique
- Adaptative
- Une technologie devenue mature

Cette technique de dépollution harmoniques, Permet d'effectuer plusieurs fonctions à la fois telles que :

- Compensation de la puissance réactive
- Élimination de certaines harmoniques
- Stabiliser la tension et éviter la résonance
- Disponible pour les installations sous différentes topologies :
 - a. Deux fils (système monophasé),
 - b. Trois fils sans neutre (système triphasé),
 - c. Quatre fils (3-phases avec le neutre)

V.5.1 Filtrage actif parallèle (shunt) FAP

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure 5.4, est le plus souvent commandé comme une source de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. Il est placé en parallèle avec la charge. On parle alors de filtre shunt ou parallèle. Il existe deux types de fonctionnement pour un filtre actif parallèle :

a. Compensation de tensions harmoniques :

Le filtre actif parallèle compensateur de tension a pour rôle de maintenir sinusoïdale la tension à ses bornes, c'est-à-dire du côté de la charge. Le filtre actif injecte un courant harmonique au travers de l'impédance du réseau de façon à créer à ses bornes une chute de tension harmonique qui permet de régler la tension harmonique aux bornes de la charge. Cette stratégie de filtrage convient lorsque l'impédance de ligne Z_s est suffisamment grande. En effet, le dimensionnement en courant du filtre actif dépend du rapport: tension -source / impédance -source [7].

b. Compensation de courants harmoniques :

Le filtre actif parallèle compensateur de courant injecte un courant qui s'oppose au courant harmonique émis par la charge. L'ensemble charge/filtre se présente sur le réseau comme une charge qui absorbe un courant sinusoïdal. Le dimensionnement du filtre actif dépend du courant harmonique à fournir.

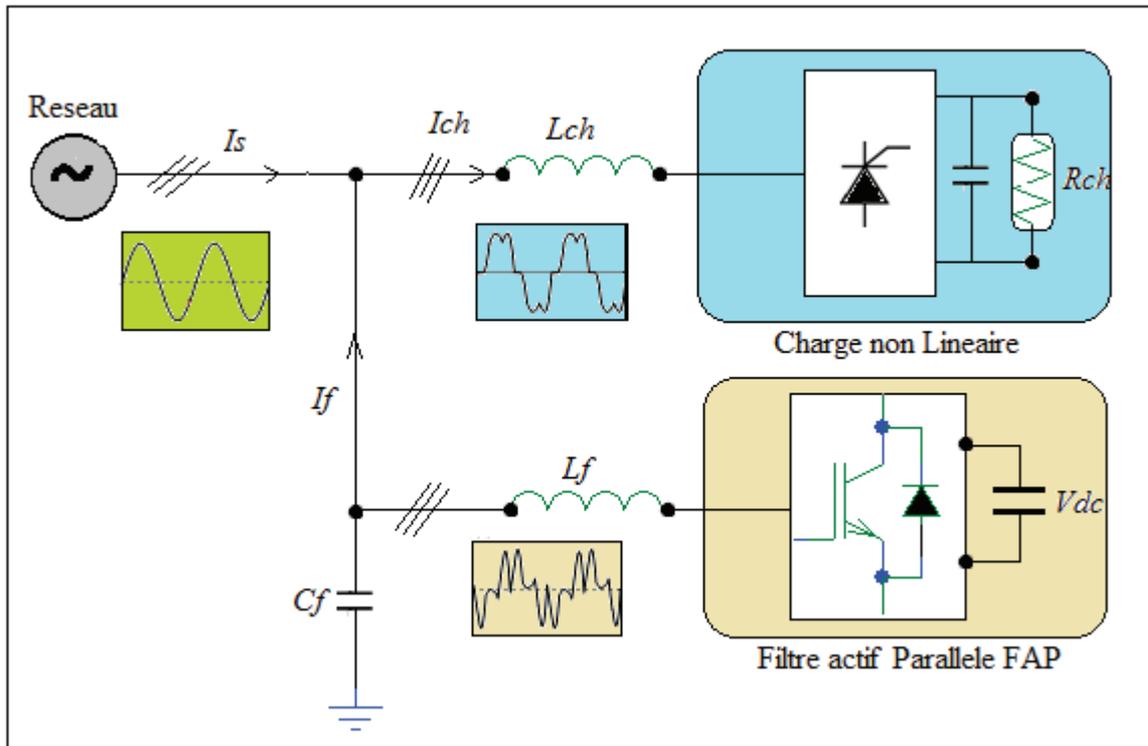


Figure 5.4 : Structure de filtre actif parallèle (shunt) ; Compensation de courants harmoniques.

V.5.2 Filtrage actif série FAS

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique), comme le montre la figure 5.5, venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [7]. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale

Cependant, le filtre actif fonctionnant en compensateur de tension fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique du côté de la source et à la chute de tension harmonique due à la charge non-linéaire. Il permet de limiter la tension harmonique aux bornes de la charge.

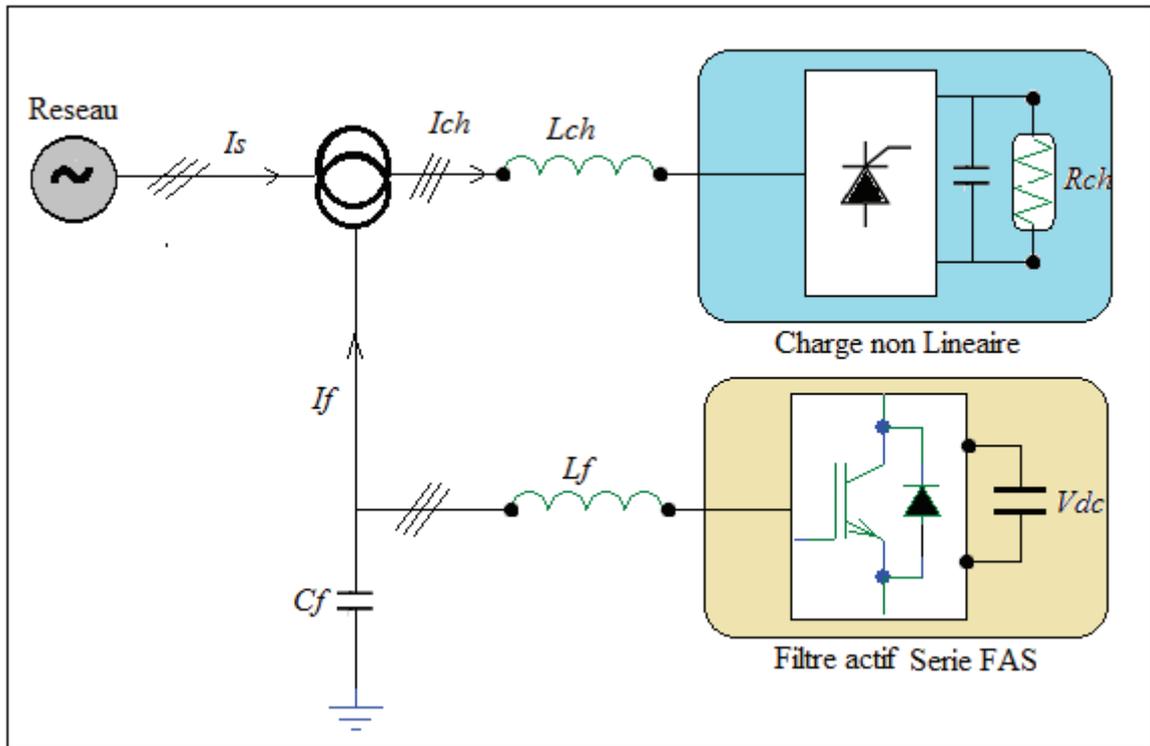


Figure 5.5 : structure de filtre actif série ; Compensation de tensions harmoniques

V.5.3 Filtrage hybride (mixte actif -passif)

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif. L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance/coût et d'avoir une meilleure tenue de tension. De nombreuses variantes sont possibles mais peu ont été réalisées industriellement. Des performances élevées sont possibles, même avec un filtre actif de puissance réduite [9].

V.5.4 Filtre actif série associé avec filtre passif en parallèle avec la charge

Dans cette structure de filtrage hybride comme est montrée par la figure 5.6, on note que le filtre actif série est chargé d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les piéger à passer au travers le filtre passif raccordé à sa propre fréquence.

Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau, ils absorbent une grande partie des courants harmoniques créés par la charge non linéaire. Le filtre actif fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire de façon à contrôler la tension harmonique aux bornes de la charge.

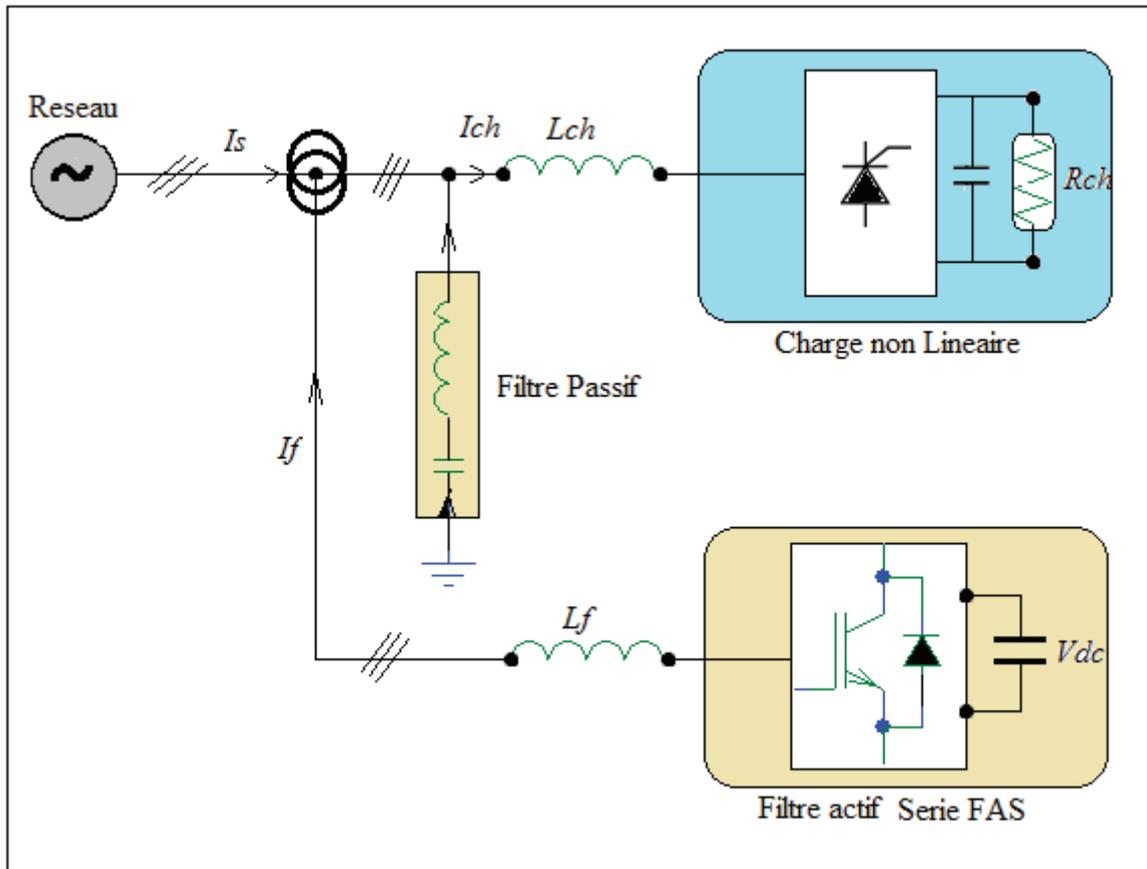


Figure 5.6 : structure de filtrage hybride ; Filtre actif série/ filtre passif parallèle.

V.5.5 Filtre actif série associé avec filtre passif en série avec la charge

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en figure 5.7, est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est plus faible. Cette topologie n'est pas adaptée pour traiter un réseau à fort taux de pollution de la tension amont; néanmoins, ses performances minimisent le dimensionnement des filtres passifs et complètent leurs effets. Cette structure est donc bien adaptée à traiter les réseaux de puissances et tensions élevées, tout en assurant le déphasage des composantes fondamentales. Son principal inconvénient est que les filtres passifs sont définis en fonction de la nature de chaque charge ce qui nécessite toujours une étude préalable [5].

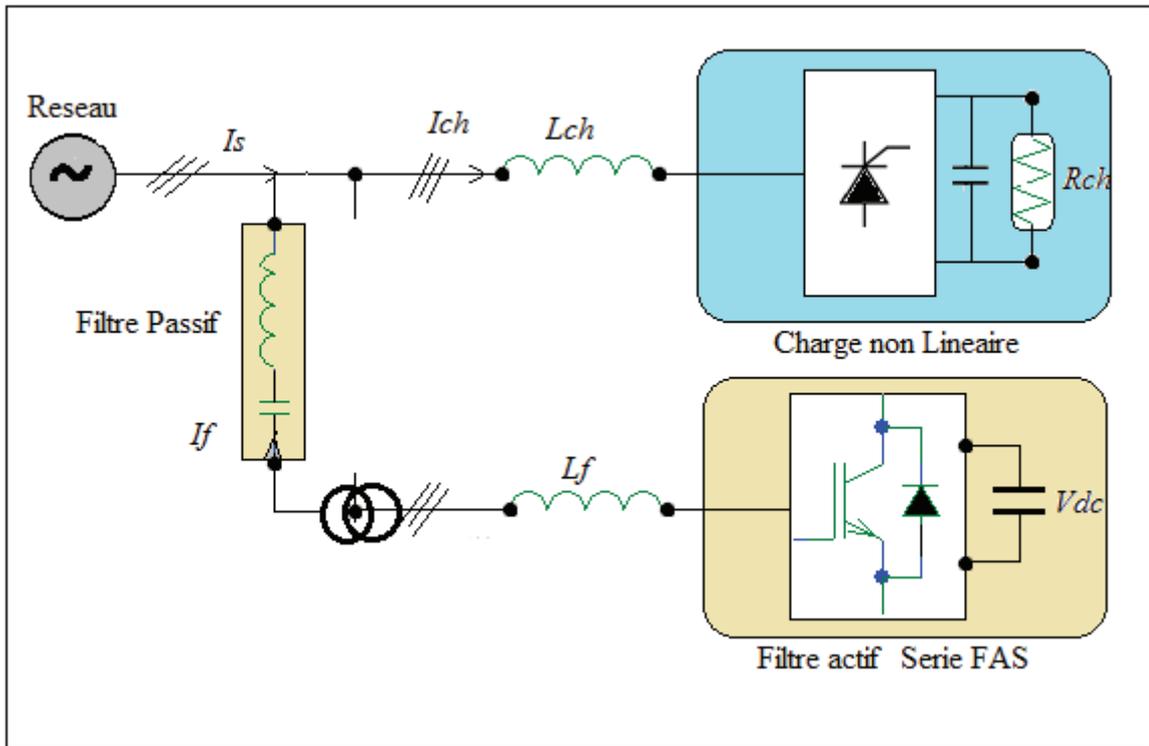


Figure 5.7 : Filtrage hybride ; filtre actif série/ filtre passif, en séries avec la charge

V.5.6 Filtre actif et filtres passif en parallèle avec la charge

La structure de filtrage hybride, montrée dans la figure 5.8, permet la compensation des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. Ce type de filtrage a déjà été appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cycloconvertisseur de forte puissance.

Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau. Le filtre actif se comporte comme une source de tension contrôlée en courant. Les composantes harmoniques du courant de la charge sont absorbées par la branche parallèle. Le courant i_s du réseau est alors sinusoïdal.

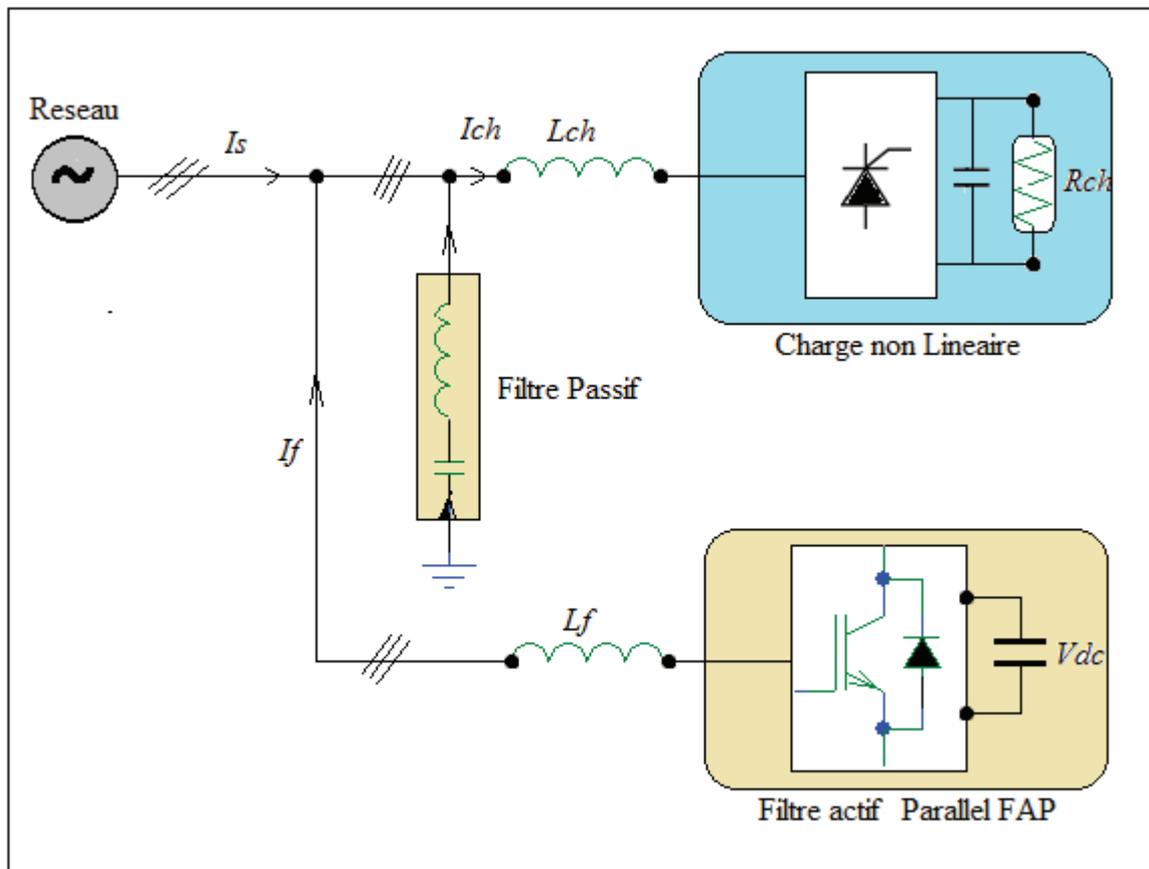


Figure 5.8: Filtrage hybride ; filtre actif shunt/ filtre passif, en parallèles avec la charge

V.5.7 Filtres hybrides parallèles dédiés à l'amortissement de la résonance

L'atténuation de la résonance harmonique dans les systèmes de distribution est un problème qui demande une attention spéciale. La solution la plus efficace et la plus économique est d'adopter des filtres hybrides dans lesquels les filtres actifs agissent comme une composante variable fictive apte à changer les conditions opératoires du système d'une manière dynamique dans le but d'atténuer la résonance. En plus, la performance du filtre passif est aussi améliorée. Selon la configuration du système de filtrage et de la stratégie de commande, la composante générée peut être résistive ou inductive ou elle peut être les deux. Il est important de souligner que le filtrage harmonique et l'atténuation de la résonance ne sont pas toujours compatibles. Le contrôle visé pour le filtrage harmonique en régime permanent peut avoir des effets négatifs par rapport à l'atténuation de la résonance durant le régime transitoire.

Les filtres actifs hybrides peuvent fournir aussi bien un bon amortissement de la résonance que le filtrage harmonique; par ailleurs la performance dépend autant de la configuration que de la stratégie de contrôle. Le filtre actif agit comme une impédance fictive dans le circuit et change par conséquent les caractéristiques fréquentielles du système. Comme la nature de l'impédance active peut être variée par la commande, elle présente une solution adaptative pour l'amortissement de la résonance harmonique. Cependant, un compromis est à résoudre entre le filtrage harmonique et l'amortissement de la résonance.

V.5.8 Filtrage par combinaison des deux filtres actifs (FAS/FAP)

La combinaison parallèle - série actif est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série (figure 5.9). Cette nouvelle topologie

est appelée combinaison parallèle série actifs (*Unified Power Quality Conditioner : UPQC*). L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série.

- * Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle, il permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices.
- * Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

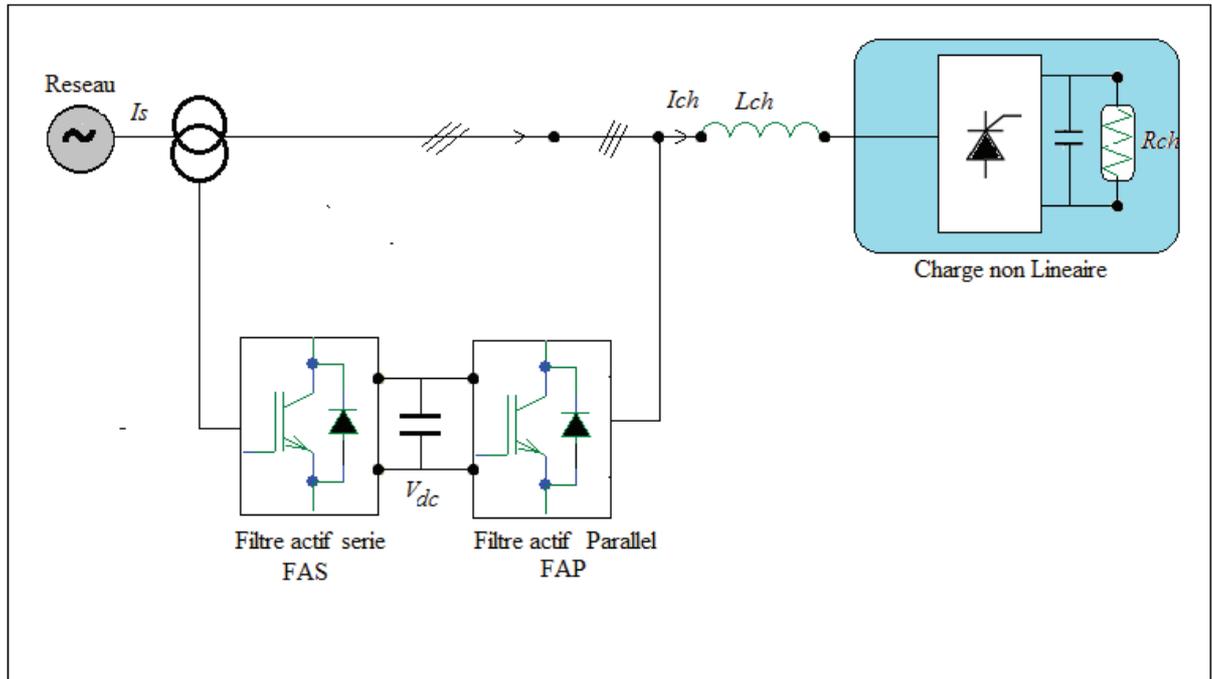


Figure 5. 9 : Combinaison ; filtre actif série avec filtre actif parallèle; UPQC

V.6 Avantages et inconvénients des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages:

- Il s'adapte automatiquement à l' évolution des charges et du réseau;
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques (dans la limite de sa bande passante);
- Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction;
- Le risque de résonance entre le filtre et l'impédance du réseau ne se présente pas comme dans le cas du filtre passif;
- Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

Toutefois, le filtrage actif présente quelques inconvénients :

- Le filtrage actif n'est possible que dans le cas des réseaux de faible puissance;
- Il permet la compensation de l'énergie réactive, mais à un coût très élevé par rapport au filtrage passif;
- Son coût est beaucoup plus élevé que celui du filtrage passif.
- Le filtrage actif est donc plus intéressant sur des charges ne nécessitant pas de compensation de la puissance réactive. Par contre, le filtrage passif est intéressant sur des charges nécessitant cette compensation.

Principes	Avantages	Inconvénients
Renforcement de la puissance de court-circuit	Amélioration de la forme de la tension	Pas d'amélioration de la forme du courant, pas toujours réalisable
filtrage passif	Amélioration de la forme du courant	Risque de résonance, pas d'adaptabilité
Redresseur Dodécaphasé	Harmoniques 5, 7, 17 et 19 sont éliminés	Harmoniques de rang $12k \pm 1$ sont conservés
Filtrage actif série FAS	Amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	pas d'amélioration de la forme du courant
Filtrage actif parallèle FAP	Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	Amélioration de la forme de la tension pas toujours évidente
Combinaison Parallèle - Série Actifs UPQC	Amélioration de la forme du courant, amélioration de la forme de la tension, adaptabilité aux variations de charge et du réseau	Réalisation difficile

Tableau 5.1 : Récapitulatif des solutions de dépollution

CRITÈRES DE COMPARAISON	FILTRE ACTIF	FILTRE PASSIF
Action sur les courants harmoniques	Agit simultanément sur plusieurs fréquences selon sa bande passante	Nécessite un filtre pour chaque harmonique (encombrant)
Interaction entre filtres voisins	Pas de risque	Risque de destruction de filtres accordés à des fréquences voisines (résonance)
Influence d'une variation de fréquence	Aucune conséquence	Efficacité réduite (le filtre est calculé pour une fréquence exacte)
Surcharge	Pas de risque	Risque de détérioration lorsque le courant harmonique à compenser dépasse ses capacités
Variation de l'impédance du réseau	Aucune conséquence	Risque d'amplification des harmoniques (déplacement de la fréquence d'antirésonance vers une fréquence harmonique)
Vieillessement	Pas d'influence sur les performances	Risque de dégradation des performances (dérive de la fréquence d'accord)
Raccordement	Pas d'étude préalable	Etude au cas par cas
Surveillance de fonctionnement	Réalisée par le système de contrôle commande	Pas de surveillance
Influence d'une augmentation de courant	Aucun risque de surcharge, mais efficacité diminuée	Risque de surcharge et de détérioration
Rajout d'équipement en aval	Pas de problème (dans la limite de la puissance du filtre)	Nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas
Encombrement	Faible	Important
Poids	Faible	Elevé
Coût	Coût composant plus élevé Pas de coût d'étude de dimensionnement	Coût composant plus faible Étude de dimensionnement obligatoire

Tableau 5.2 : présente les éléments de comparaison entre le filtrage passif et le filtrage actif.

CHAPITRE VI

Stratégies de Commande et Dimensionnement des Filtres Actifs

Chapitre VI : Stratégies de commande et dimensionnement des filtres actifs

VI.1 Introduction

Dans cette section a été présenté les différentes techniques de commande déjà mises en œuvre dans le contrôle du filtre actif. Ces commandes du filtre actif sont utilisées pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif très proche de sa référence. La modulation d'impulsions de commande des composants semi-conducteurs incorporés dans le filtre actif, permet de générer à partir d'un signal erreur, sortant d'un régulateur, des signaux de commande de ces interrupteurs.

Cependant, Plusieurs techniques de commande peuvent être utilisées :

- Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)
- MLI inter-sélective,
- MLI vectorielle,
- Commande par hystérésis,
- Commande par hystérésis avec modulée,

VI.2. Commande par modulation de largeur d'impulsion MLI

La stratégie de commande par modulation de largeur d'impulsion, est un moyen adéquat pour la commande des interrupteurs semi-conducteurs dans des conditions plus favorables. Les composants semi-conducteurs sont souvent soumis à des commutations de hautes fréquences, accompagnées de différents valeurs de puissances. Cependant, l'appelle à la commande des gâchettes, par des impulsions réalisées par MLI, constitue une solution préliminaire pour contribuer à l'amélioration du facteur de puissance.

Le signal de commande des interrupteurs est généré à partir de la comparaison du signal de référence sinusoïdal de fréquence $f_r=1/T_r$ et du signal de modulation triangulaire ou porteuse de fréquence $f_p = 1/T_p$ (figure 6.1). Deux paramètres principaux caractérisent la commande à MLI:

- L'indice de modulation : $m = fp/fr$, avec $m \geq 1$.
- Le coefficient de réglage : $r = Vrmax / Vpmax$,
- Généralement r est compris entre zéro et un ($0 < r < 1$).

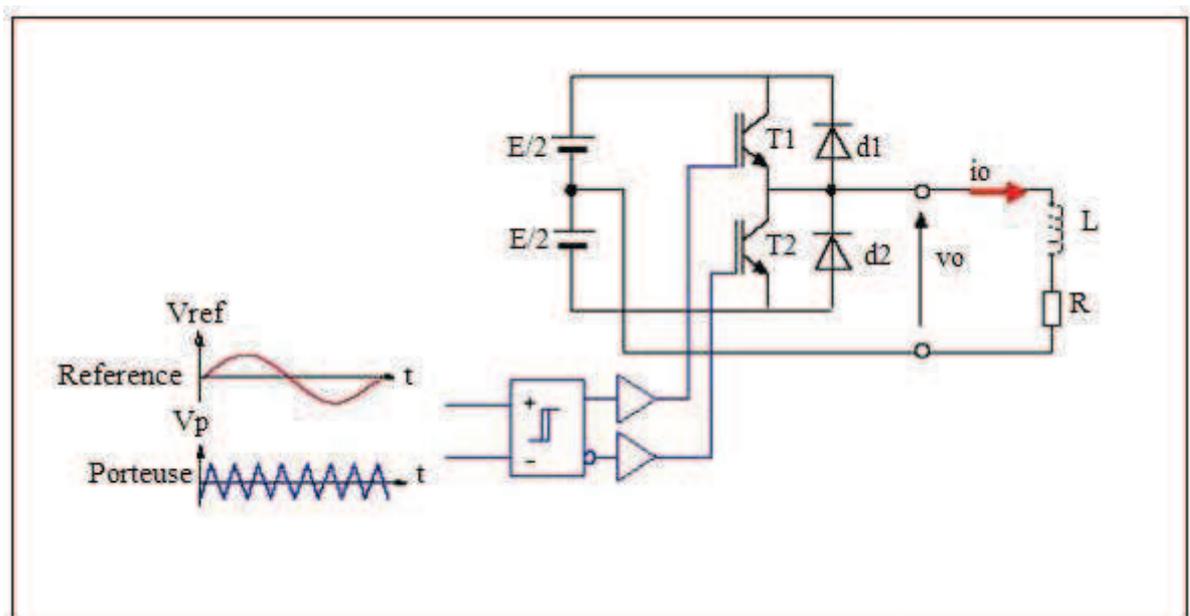


Figure 6.1: Schéma de principe de l'onduleur monophasé commandé par MLI sinus-triangle.

VI.2.1 Principe Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la technique de commande par MLI, qui résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation, dont le schéma de principe est donné par la figure 6.2.

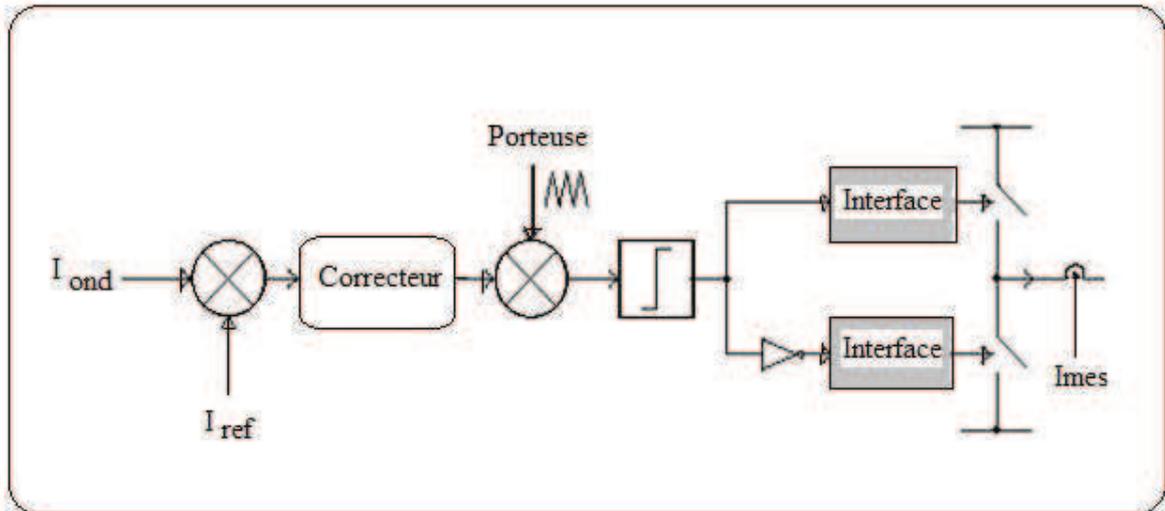


Figure 6.2 : Principe de commande des courants par MLI.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, comme le montre la figure 6.3. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur 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. D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- La MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse.
- La MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

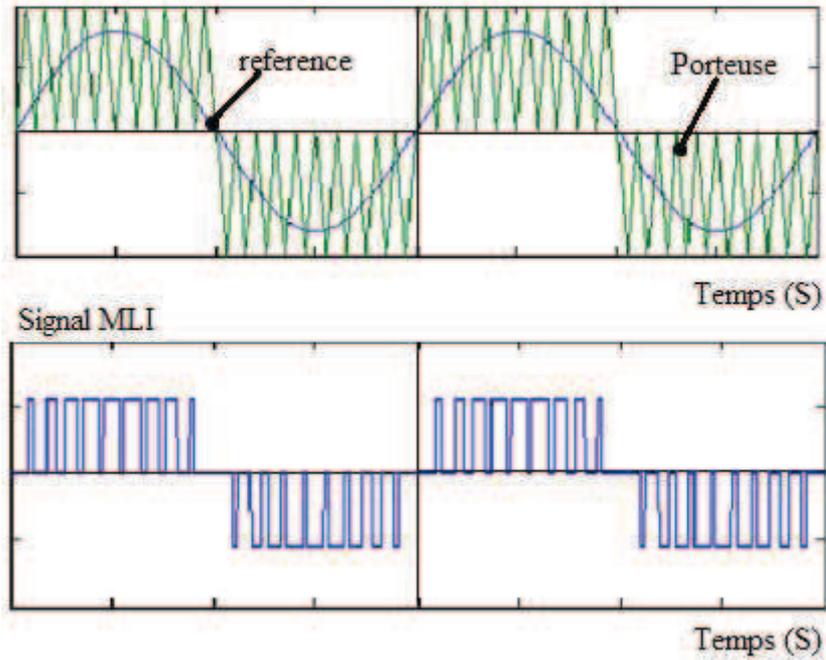


Figure 6.3 : Génération de la commande par modulation de largeur d'impulsions MLI.

VI.3 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, comme le montre la figure 6.4.

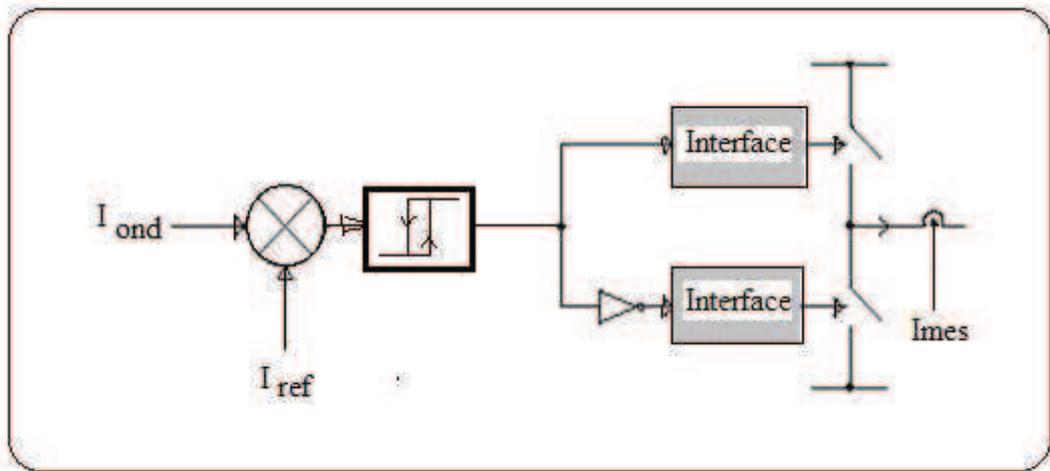


Figure 6.4: Principe de la commande des courants par hystérésis

Dés que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure (figure 6.5), un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haut fréquences dû aux fréquences de commutations.

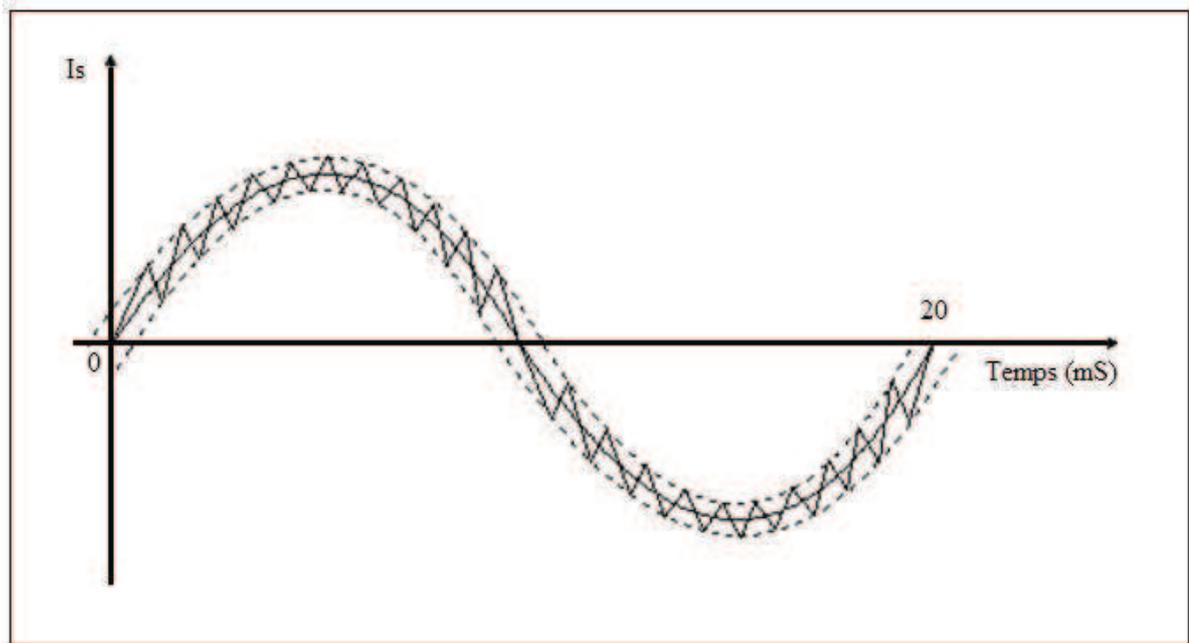


Figure6.5: Commande par hystérésis

Ce problème peut être résolu par une autre stratégie de commande qui peut être proposée à savoir la commande par hystérésis modulée. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l’hystérésis [17].

VI.3.1 Commande par hystérésis modulée

La commande par hystérésis modulée est capable d'apporter une amélioration par rapport à la commande hystérésis conventionnelle dont, la fréquence de commutation des semi conducteurs est fixée. Cette technique permet de comparer le signal d'erreur (entre la référence et le signal du filtre), à un signal triangulaire à la fréquence de commutation comme est montré dans la figure 6.6. Cependant, La fréquence doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance.

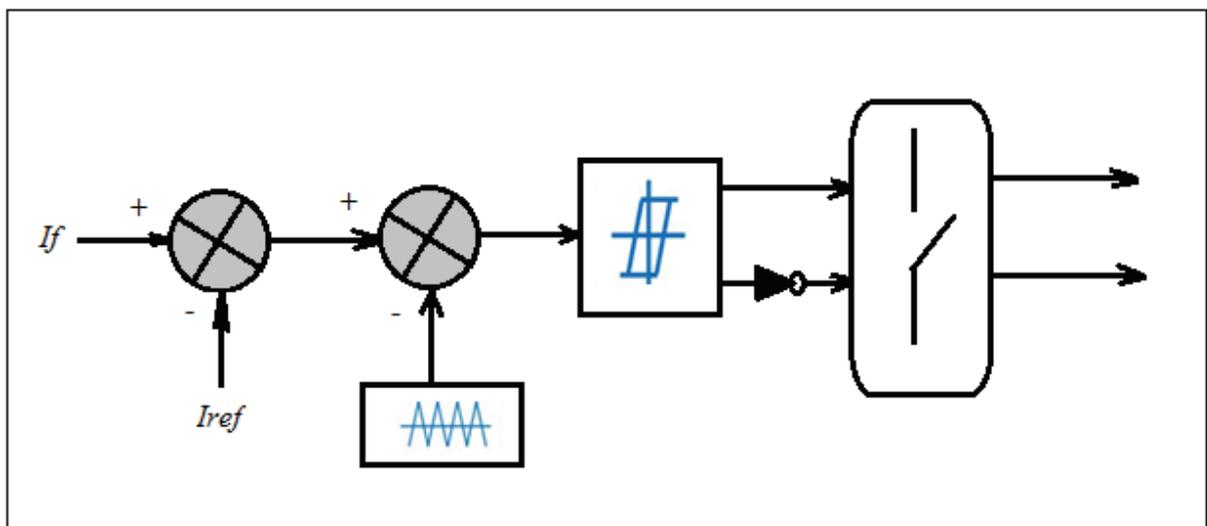


Figure 6.6 : Commande par hystérésis modulée.

VI.4 Mise en œuvre de la commande du filtre actif

A titre explicatif, on considère le schéma bloc illustré dans la figure 6.7 dont un filtre actif shunt assure une compensation en courants harmoniques polluants. Le courant I_{ch} appelé par la charge non-linéaire est mesuré afin d'extraire sa composante harmonique pour l'utiliser comme consigne de la commande. En fonctionnement idéal, sous instruction, le filtre actif génère un courant de compensation I_f égal à la consigne calculée pour ramener le courant I_s à travers la source sous forme d'une forme d'onde proche de la sinusoïde.

Dans la figure 6.7, le schéma bloc de commande générique présente deux parties. La première, qui est d'une grande importance pour les performances du filtre, est la génération des signaux harmoniques de référence. La seconde est la génération des signaux de contrôle servant à l'ouverture et à la fermeture des semi-conducteurs. Ces deux parties sont cruciales au niveau de la performance du filtre actif. Il est à noter que la partie commande peut être réalisée à l'aide de composants analogiques et numériques.

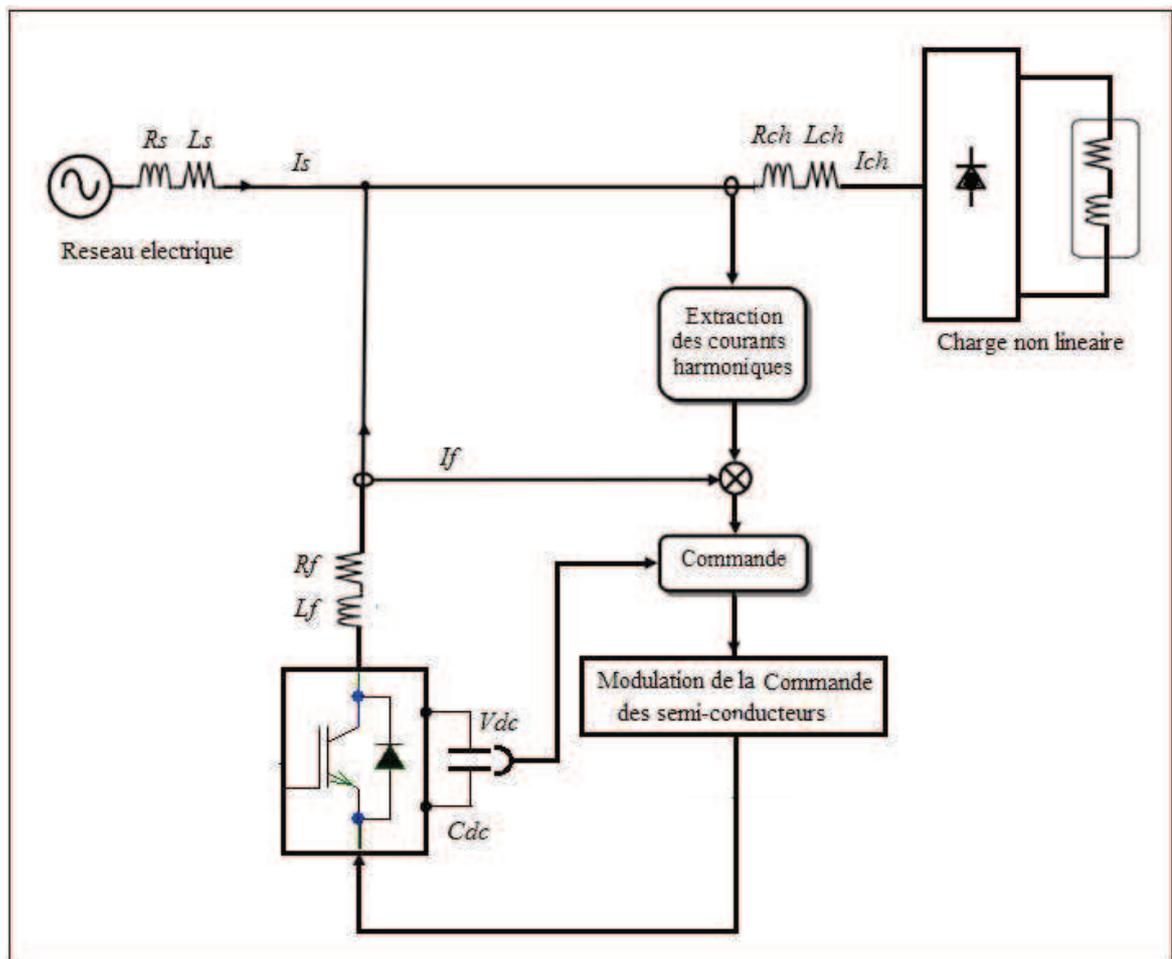


Figure 6.7 : Schéma bloc de commande générique d'un filtre actif Shunt.

VI.4.1 Génération de signaux de référence

La génération de signaux de référence servant au contrôle de l'ouverture et de la fermeture des semi-conducteurs de l'onduleur est réalisée à l'aide d'algorithmes de contrôle que l'on peut classer dans les domaines temporels, fréquentiels ou autres. Afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif, différents algorithmes de commande peuvent être envisagés comme suit:

A. Domaine fréquentiel

Cet algorithme est principalement basé sur l'application de la transformée de Fourier sur les courants et les tensions harmoniques dans le domaine fréquentiel :

- La transformée de Fourier discrète (TFD).
- La transformée de Fourier rapide (TFP) dans le domaine fréquentiel.
- La transformée de Fourier discrète récursive (TFDR)

B. Domaine temporel

Plusieurs algorithmes sont utilisés pour la détermination des grandeurs de références (courants, tensions, puissances), ces dernières, par comparaison avec les grandeurs des harmoniques ciblées, permet la génération de la commande des semi-conducteurs du filtre actif. Parmi les méthodes de compensation, on trouve :

- Méthode des puissances instantanées p-q
- Méthode modifiée des puissances instantanées
- Méthode indirecte
- Méthode du courant instantané d-q
- Filtre adaptatif cloche (ou filtre Notch)
- La Boucle à verrouillage de phase
- Filtre de Kalman

VI.4.2 Algorithmes de contrôle dans le domaine fréquentiel

Les stratégies de contrôle dans le domaine fréquentiel sont basées sur l'analyse de Fourier de la tension ou du courant non sinusoïdal pour en extraire les harmoniques de compensation. En utilisant la transformée de Fourier discrète (TFD), le signal pollué est mesuré sur un cycle complet, puis est converti dans le domaine fréquentiel, ce qui permet l'élimination de la composante fondamentale par l'application d'un filtre. Par la suite, l'application de la TFD inverse reconvertit le signal dans le domaine temporel et sert de signaux de compensation. La majorité des autres méthodes de génération d'harmoniques dans le domaine fréquentiel sont des variantes de l'application de la TFD. Ils existent d'autres méthodes plus performantes telles que : la transformée de Fourier rapide (TFR) et de la transformée de Fourier discrète récursive (TFDR) [15] qui sont des méthodes de calcul plus performantes que la TFD.

VI.4.3 Algorithmes de contrôle dans le domaine temporel

Les méthodes de contrôle dans le domaine temporel sont basées sur la comparaison instantanée des signaux de compensation harmonique de référence, sous forme de tension ou de courant, aux signaux harmoniques réels. Le principe est de maintenir la tension ou le courant instantané de référence proche du signal réel avec une tolérance raisonnable. Le plus grand défi de cette approche est sans doute l'élimination de la composante fondamentale pour générer des signaux harmoniques de référence. La plus connue de ces stratégies qui a fait ses preuves, est sans doute la méthode des puissances instantanées [17-18].

VI.4.3.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Dans la littérature, une nouvelle approche mathématique sur le sujet des puissances instantanées a été mise en épreuve au début des années quatre-vingt. Cette méthode est basée sur la mesure des variables instantanées triphasées présentes sur le réseau électrique avec ou sans composantes homopolaires. Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire [18]. Dans cet algorithme de contrôle, les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée (a-b-c) sont converties en système biphasé (α - β) équivalent à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante (figures 6.8 et 6.9) :

Alors, par le billet de cette transformation (α - β), on obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

La puissance réelle instantanée p et la puissance réactive instantanée q peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

Ce qui nous donne :

$$P = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad \Rightarrow \quad \text{Puissance réelle instantanée}$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad \Rightarrow \quad \text{Puissance imaginaire instantanée}$$

La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad \text{et} \quad q = \bar{q} + \tilde{q}$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire les expressions ci-dessous comme suit:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (6.4)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (6.5)$$

Où p et q sont, de façon respective, les composantes des puissances moyennes actives et réactives correspondant au courant de charge fondamentale (50/60 Hz), alors que \tilde{p} et \tilde{q} correspondent aux composantes alternatives liées au courant harmonique. La compensation d'harmoniques par le filtre actif se fait par la génération de ces dernières :

$$p^* = \tilde{p} \quad \text{et} \quad q^* = \tilde{q}$$

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans les équations 6.4 et 6.5 s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas de Butter-Worth (figure 6.9) d'ordre deux.

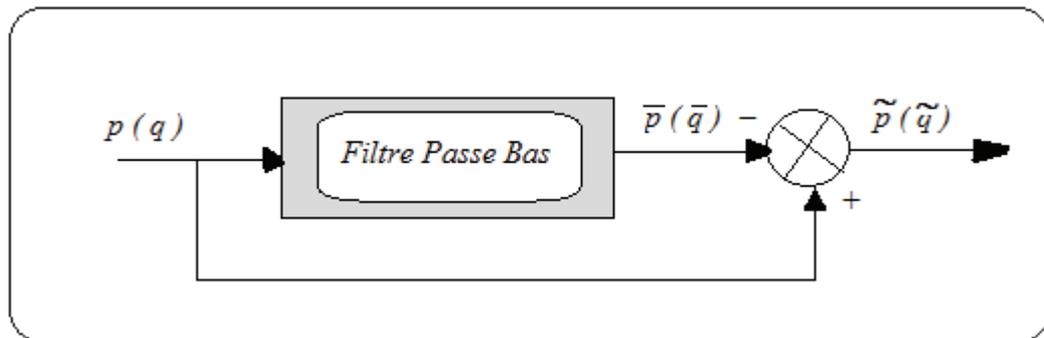


Figure 6.9 : Filtrage de la composante de la puissance continue, filtre passe bas ; FPB.

Les courants de compensation de référence se calculent par la formule suivante :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{2}/3 \\ 1/2 & -\sqrt{2}/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p^* \\ q^* \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

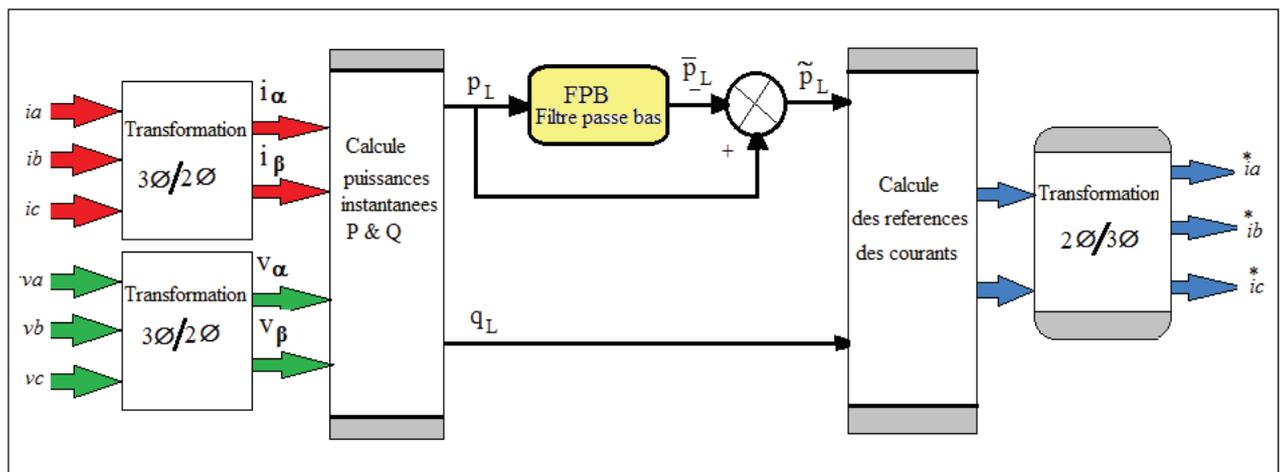


Figure 6.10 : Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées dans le cas de compensation de l'énergie réactive.

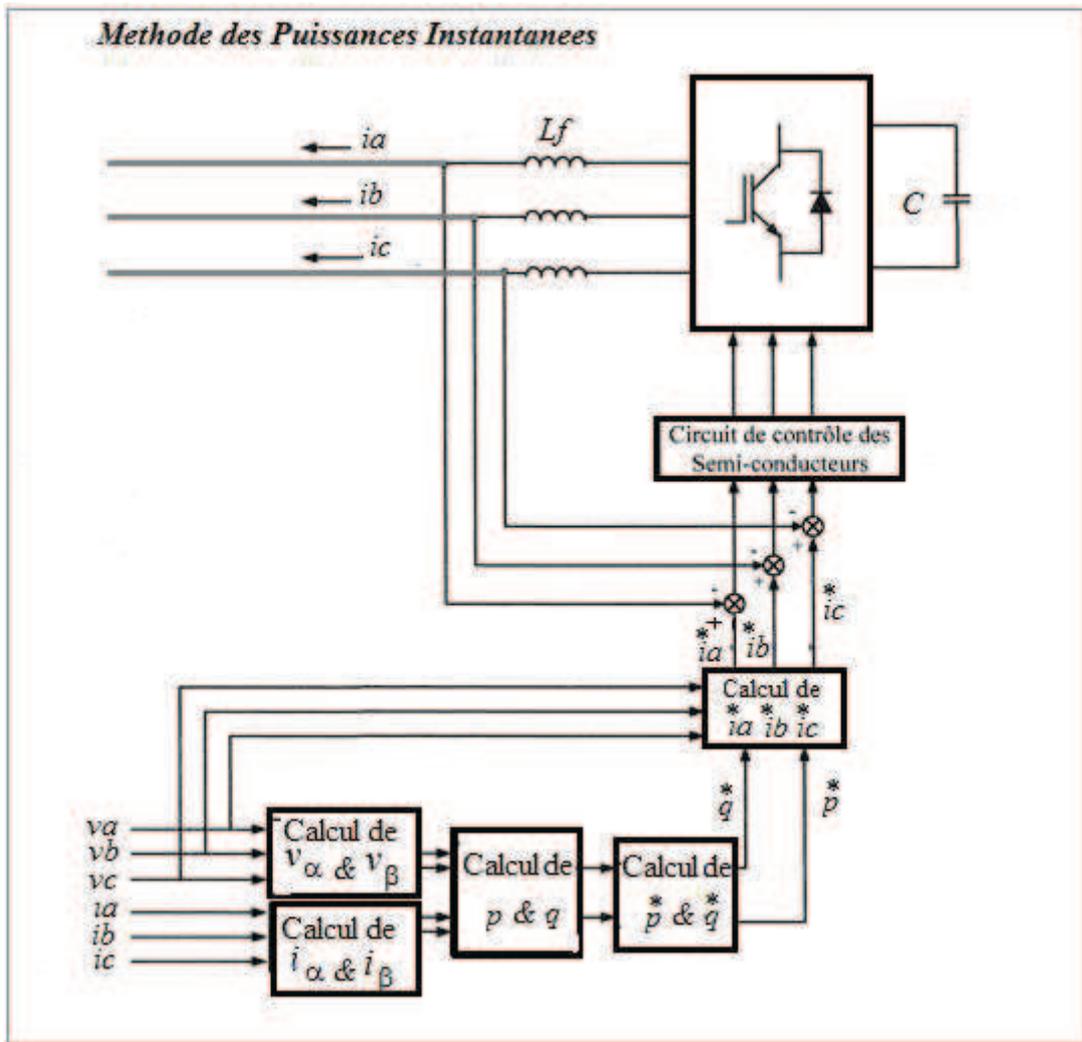


Figure 6.11 : Méthode des puissances instantanées dans le cas de compensation de l'énergie réactive.

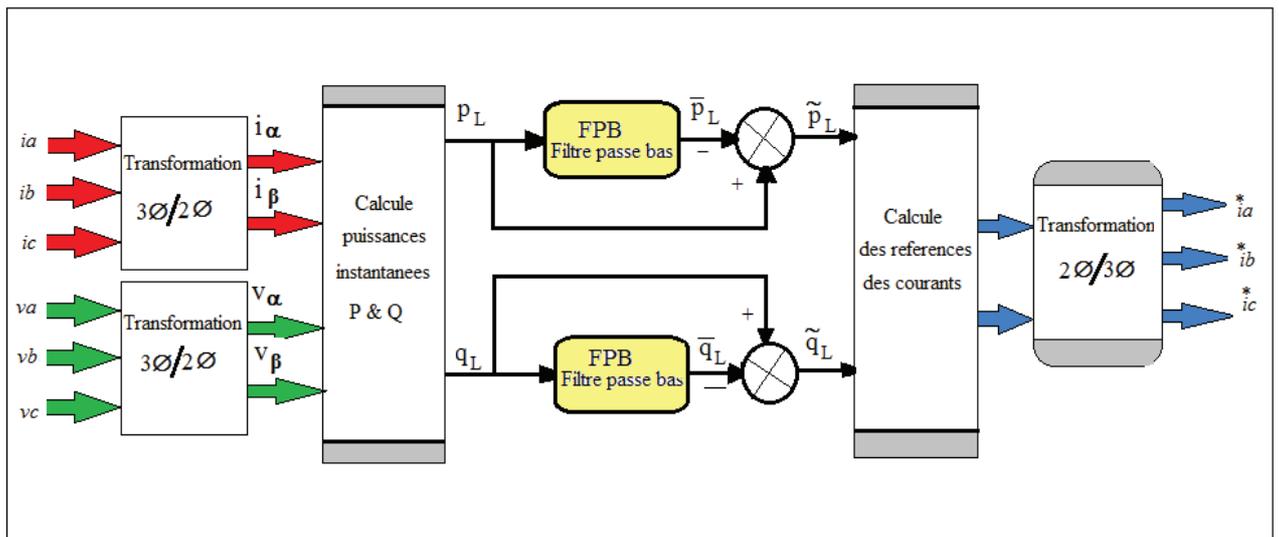


Figure 6.12: Principe de la méthode des puissances instantanées dans le cas de compensation des courants harmoniques

Avantages de la méthode des puissances instantanées

La méthode des puissances instantanées possède les quelques caractéristiques suivantes :

- * Elle est une théorie inhérente aux systèmes triphasés.
- * Elle est peut être appliquée à tout type de systèmes triphasés (équilibré ou déséquilibré, avec ou sans harmonique).
- * Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- * Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif.
- * Méthode de calcul simple (elle n'est composée que d'expression algébrique et peut être implémentée à l'aide d'un processeur standard).

VI.4.3.1 Méthode de commande basée sur le référentiel synchrone

Cette méthode appliquée pour le filtrage consiste à transformer les coordonnées a - b - c du courant en coordonnées d - q et ce, à l'aide de la transformée de Park en fixant la fréquence de celle-ci en synchronisme avec celle du réseau [17]. Le système d'équation de cette transformation de Park est donné par la formule 6.8 comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos(\omega t) & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (6.8)$$

Le passage du courant dans la transformée de Park synchronisée avec la fréquence du réseau a pour effet de transformer la composante du courant fondamental en composante continue, tandis que les composantes du courant harmonique subissent un décalage dans le spectre de fréquence. L'élimination de la composante continue est réalisée par l'ajout d'un filtre passe-haut (FPH), comme est montré dans la figure 6.12 et 6.13. L'obtention du courant de référence s'obtient en effectuant la transformée inverse de Park (formule 6.9) toujours en synchronisme avec la fréquence du réseau.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \\ \sin(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Cette méthode de l'identification des grandeurs de références est capable de garantir une bonne robustesse de commande du filtre. Les avantages les plus contestés sont :

- Détermination des perturbations avec précision,
- Rapidité et facilité d'implantation.

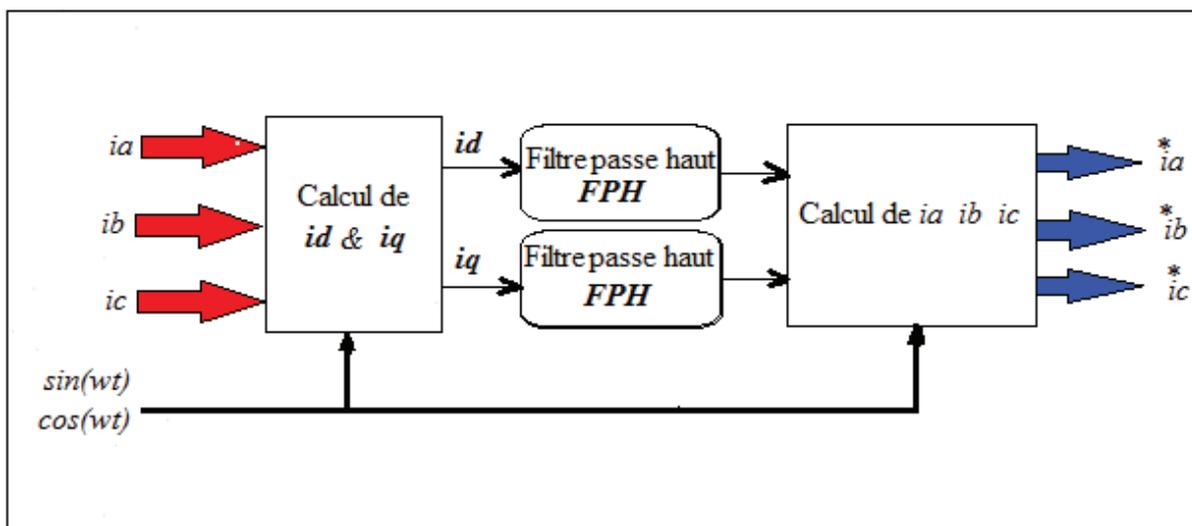


Figure 6.13: Principe de commande basée sur le référentiel synchrone

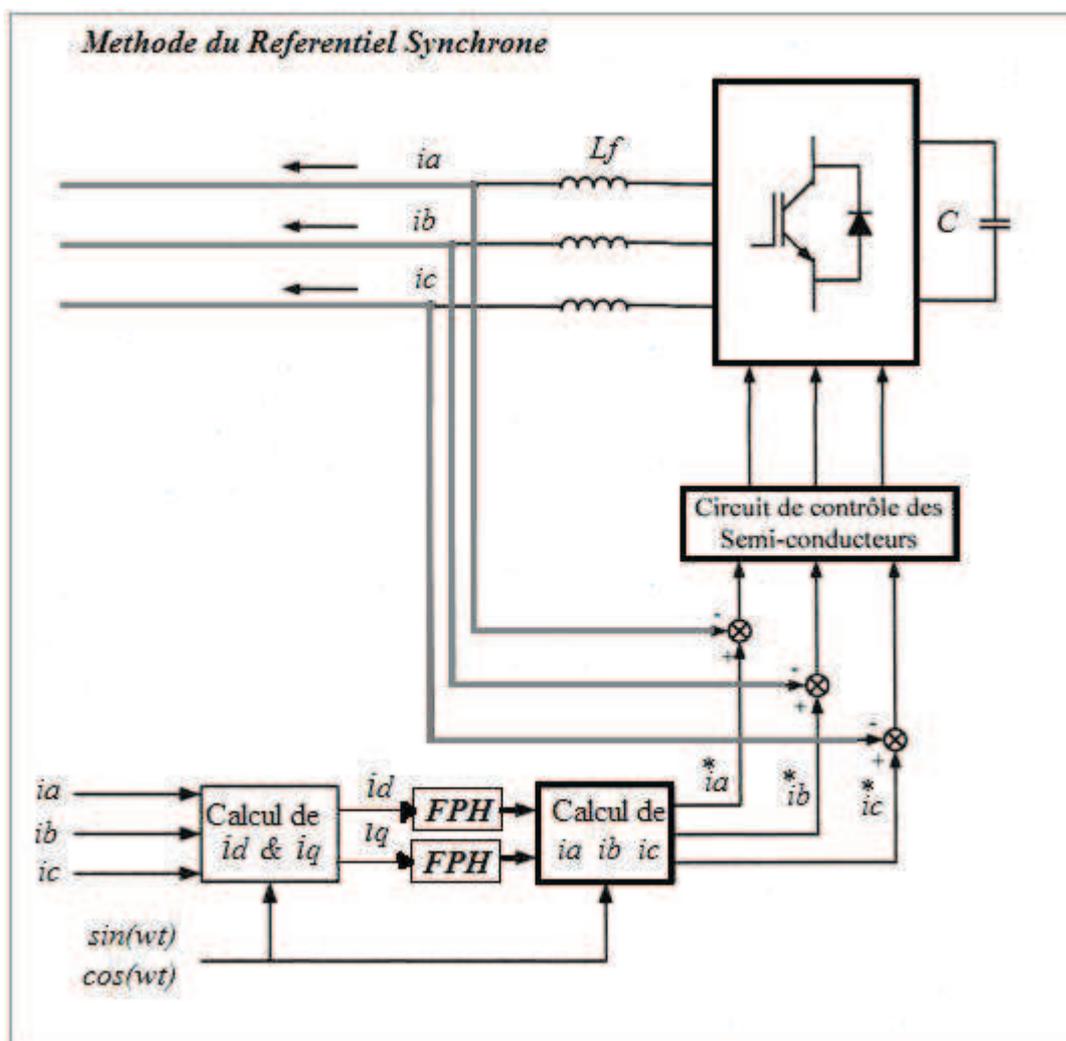


Figure 6.14: Montage principe de l'algorithme de commande basée sur le référentiel synchrone.

VI.4.4 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est un algorithme qui permet d'estimer l'état d'un système à partir des données mesurées. Il tient son nom de l'ingénieur hongrois Rudolf Kalman, qui a joué un rôle important dans son développement. L'algorithme du filtre est un processus en deux étapes : la première étape consiste à prédire l'état du système et la seconde étape utilise les mesures bruitées pour affiner l'estimation de l'état du système. Il y a désormais plusieurs variantes du filtre Kalman d'origine. Ces filtres sont largement utilisés dans le cadre d'applications qui reposent sur l'estimation, parmi lesquelles la vision par ordinateur, les systèmes de guidage et de navigation, l'économétrie et le traitement du signal.

De nombreuses autres méthodes d'optimisation et d'estimation peuvent également être utilisées comme celle du filtre de Kalman [19,20]. Cependant, à l'heure actuelle, les principaux développements portent sur des méthodes non classiques basées sur la théorie des réseaux de neurones artificielles et de la logique floue. Ces méthodes permettent l'élaboration d'algorithmes de commande où l'équationnelle du système de commande n'est pas connue. Ces algorithmes de commande sont parfois utilisés en combinaison avec les méthodes déjà citées précédemment dans le but de les rendre plus performants, alors que d'autres fois elles forment la partie commande en entier [21].

VI.5 Résumé :

Dans ce chapitre, une synthèse des différentes méthodes de commandes des filtres actifs a été présentée. Principalement, il faut connaître les algorithmes disponibles pour procéder à l'identification des harmoniques gênant à cibler pour la compensation. Parmi les méthodes les plus utilisées dans le domaine de la qualité d'énergie on cite :

- La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Son avantage est de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne compenser que les plus prépondérants. Les inconvénients les plus importants de cette méthode sont un volume de calcul, une allocation de mémoire très considérable et des résultats moyens en régime transitoire.
- La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes son traitement est basé 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 et ce, par soustraction de la partie fondamentale active du courant total.
- En outre, d'autres méthodes d'identification, en l'occurrence La méthode de détection synchrone qui repose sur la transformée de Park. Elle exige une précision parfaite du calcul de la pulsation fondamentale 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.

Conclusion générale

Le travail faisant l'objet de cette investigation, a été principalement orienté vers la problématique d'atténuation des effets des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution à l'aide de différentes stratégies de filtrage des harmoniques avec une attention particulière au problème de la résonance qui se manifeste entre les paramètres des compensateurs passifs et ceux du réseau considéré.

Dans l'état actuel du réseau électrique, il n'y a pas d'équipement qui soit apte à contrôler de façon idéale la circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges. En effet, les filtres passifs peuvent altérer d'une manière indirecte la propagation des harmoniques mais leur comportement dépend fortement de la structure du réseau. Les filtres actifs, avec un comportement plus autonome, peuvent réagir directement sur le courant ou la tension harmonique dans le réseau; comme compensateurs d'harmoniques autonomes, leurs avantages par rapport aux filtres passifs ont été démontrés dans de nombreuses applications.

L'alimentation de charges non linéaires par une source d'alimentation, dans un réseau électrique, est fréquemment soumise à des perturbations et/ou déséquilibres du courant d'alimentation reçu par la charge. Les perturbations du courant d'alimentation désignent la présence d'harmoniques dans le courant d'alimentation, celui-ci n'étant alors pas sinusoïdal, ainsi que la présence d'une puissance réactive trop importante circulant sur le réseau. Le déséquilibre des courants d'alimentation se traduit, dans un réseau polyphasé, par une mauvaise répartition des courants d'alimentation dans les différentes phases induisant un courant non nul dans le neutre côté source. En outre, dans un réseau électrique de type réseau public de distribution, ces perturbations ou déséquilibres peuvent être soumis à une réglementation du fournisseur d'énergie, c'est ainsi qu'il est utile de mettre en place un dispositif efficace pour minimiser ces perturbations et déséquilibres afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique.

Le filtrage actif est une solution efficace qui consiste à injecter un courant adapté sur le réseau pour réduire les perturbations. Toutefois, les solutions actuelles ne permettent pas d'équilibrer les courants d'alimentation de manière efficace, et peuvent même s'avérer inefficaces pour réduire les perturbations si les tensions d'alimentation sont déséquilibrées. En outre, ces solutions ne sont généralement pas utilisables à la fois en monophasé ou en polyphasé, ni avec un fil de neutre. En comparaison avec les moyens classiques de mitigation, tels que le surdimensionnement des installations ou le filtrage passif, le filtrage actif est considéré par les spécialistes des réseaux comme étant la solution la plus performante pour filtrer les harmoniques. Cependant, l'utilisation des dispositifs comme les filtres actifs pour le contrôle de la propagation des harmoniques n'a été abordée que récemment par un nombre limité de chercheurs. Plus d'études de cas sont indispensables afin de développer des solutions efficaces et viables économiquement

Bibliographie

- [01] Cahiers techniques Scheider N° CT199, CT152, CT159, CT160 et CT1.
- [02] Site web de Schneider Electric : cahiers techniques n°152, 183 et 202
- [03] G. J. WAKILEH, “*Power system harmonics-Fundamental Analysis and Filter Design*”, Springer-Verlag, 2001.
- [04] Perez – N. Bravo – M. Anton – F. Eddi, « *La menace des harmoniques : Mesure, analyse et solutions.* »Édité par Elektor.
- [05] Kamal Al-Haddad, ing. M.Sc.A. Dr. G.É Professeur, « *La Qualité de L'énergie Electrique. Filtrer Les Harmoniques de Courant et Nettoyer la Tension de La Pollution* », Montréal le 15 février 2005.
- [06] Sanae Rechka , « *Etude de Méthodes de Filtrage des Harmoniques dans les Réseaux Electriques de Distribution*», Mémoire Présenté À L'université Du Québec À Trois-Rivières. Avril 2002
- [07] Normes internationales CEI et nationales françaises NF, Guide de l'installation électrique 2010. Schneider Electric, Edition : 2010
- [08] Alain Charoy , « *Parasites et perturbations des électroniques.* »; CEM, Editions Dunod.Mode d'emploi de la pince Chauvin Arnoux F27 (pince de puissances et d'harmoniques).
- [09] Cahier Technique Schneider Electric n° 199 / p.32. CT 199(e) édition octobre 2001 Philippe Ferracci.
- [10] M-TEC Energy bvba; Nijverheidsstraat 26 Industriezone ITTERBEEK. B-2570 DUFFEL. Belgium.
- [11] Roger C. Dugan, Mark F. Granaghan, « *Electrical Power system Quality*», McGraw Hill, 2001.
- [12] Qualité de l'énergie – Cours de Delphine RIU – INP Grenoble.
- [13] Steeve. Beaulieu, « *Etude Et Mise Au Point d'un Filtre Actif d'harmoniques en vue d'Améliorer la Qualité de l'Alimentation Électrique* », Mémoire Présenté, Comme Exigence Partielle De La Maîtrise En Ingénierie, Université du Quebec a Chicoutimi , MAI 2007.
- [14] Timothy A. George and David Bones, « *Harmonie power flow determination using the fast Fourier transform* », IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp. 530-535, April 1991.
- [15] H. Akagi, Y. Tsukamoto, and A. Nabae, « *Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters* », IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 1, January/February 1990.
- [16] F.Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae, « *A Study of Active Power Filter Using Quad-Series Voltage-Source PWM Converters for Harmonic Compensation* », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 5, No. 1, January 1990.

- [17] Series Voltage-Source PWM Converters for Harmonic Compensation », IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 5, No. 1, January 1990.
- [18] R. E. Kalman. “A new approach to linear filtering and prediction problems”. Transactions of the ASME - Journal of Basic Engineering, Series D, Vol. 82, pp. 35–45, 1960.
- [19] R. Van der Merwe. Sigma-Point Kalman Filters for probabilistic inference in dynamic state-space models. Thèse de doctorat, Faculty of the OGI school of Science & Engineering, 2004.
- [20] S. Kosanam & D. Simon. “Kalman filtering with uncertain noise covariances”. Intelligent Systems and Control, pp. 375–379, Honolulu, Hawaii, U.S.A., 2004.