

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou



Faculté de génie électrique et de l'informatique

Département d'électrotechnique

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du Diplôme de Master

En électrotechnique

Option : Machines électriques

THEME

Identification et filtrage des courants
harmoniques générés par une A.S.I

Proposé et dirigé par :

M^f : S.RABAHALLAH

Étudié par : M^f : DJEBLI Brahim

M^f : BELLAHOUES Rabah

Promotion : 2012/2013

Remerciements

A l'issue de ce travail, nous tenons à exprimer toute notre gratitude à l'ensemble des personnes qui ont contribué, chacune à sa manière, à l'accomplissement de notre formation.

En premier temps, toute notre reconnaissance à notre promoteur Monsieur S.RABAHALLAH, pour son aide précieuse qu'il nous a apporté, pour son soutien scientifique et pédagogique tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier Monsieur S.HEDDAD pour son aide précieuse.

Merci à l'ensemble des membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer notre travail.

Notre sincère gratitude pour toute l'équipe de SONATRACH de R.E.B, pour leurs gentillesse et leurs dévouements, grâce à eux qu'on a pu faire nos relevés dans les meilleures conditions.

Enfin, nous exprimons toute notre gratitude à nos amis (es) qui ont partagé au quotidien nos espoirs et nos inquiétudes.

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

La mémoire de ma grande mère

Mes très chers parents qui m'ont tant soutenus dans la vie que dieu les protège

Mes frères et sœurs

Toute la promotion 2013 en particulier option machines électriques

Tous ceux qui me sont chers

Tous mes amis (es)

B. Rabah

Je dédie ce travail à :

Dj. Brahim

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralités sur les harmoniques	
Introduction	3
1-1- Définition des harmoniques	3
1-2- Décomposition d'un signal périodique	3
I-2-1- Les inter et infra harmoniques	4
I-2-2- Représentation spectrale	5
1-3- Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier	5
1-3-1- Valeur efficace d'un signal	6
1-3-2- Facteur de crête	7
1-3-3- Les puissances actives, réactives, apparentes et déformantes	7
1-3-4- Facteur de puissance.....	9
1-3-5- Taux de distorsion harmonique	9
1-4- Principales origines des harmoniques	10
1-5- Types de générateurs d'harmoniques	12
1-5-1- Génération des tensions harmoniques	12
1-5-2- Générateurs de courants harmoniques	12
1-6- Effets des harmoniques sur le réseau électrique	13
1-6-1- Les différents types d'effets	14
1-6-2- Effets des harmoniques sur les appareils électrotechniques.....	15
1-6-3- Effets des harmoniques sur les composants passifs	16
1-7- Les principaux phénomènes rencontrés	18
1-7-1- Le phénomène de résonance	18
1-7-2- Les échauffements dans les conducteurs et l'équipement électrique	18
1-7-3- Les facteurs crêtes élevés	19
1-7-4- Les effets dans le conducteur neutre	19
Conclusion.....	20
Chapitre II : Technique de Filtrage des harmoniques	
Introduction	21
2-1- Les techniques classiques de filtrage	21

2-1-1- Choix du raccordement des charges polluantes au réseau	21
2-1-2- Couplage spécial de transformateurs	22
2-1-3- Utilisation d'un redresseur à deux ponts	23
2-1-4- Inductances (selfs) série	24
2-1-5- Renforcement de la puissance de court-circuit	24
2-2- Les nouvelles techniques de filtrage	24
2-2-1- Filtrage passif	24
2-2-1-1- Inductance anti-harmonique.....	24
2-2-1-2- Filtre résonant	26
2-2-1-3- Filtre amorti	29
2-2-2- Filtre actif	30
2-2-2-1- Filtre actif série	31
2-2-2-2- Filtre actif parallèle	31
2-2-3- Comparaison entre filtrage passif et filtrage actif	33
2-2-4- Combinaison hybride actif et passif.....	34
2-2-4-1- Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	34
2-2-4-2- Filtre actif et filtres passifs en parallèles avec la charge	34
2-2-4-3- Le filtre actif parallèle et le filtre passif parallèle	35
Conclusion	36

Chapitre III : Alimentation sans interruption

Introduction.....	37
3-1- Alimentation principale	37
3-2- Alimentation de secours	38
3-3- Alimentation sans interruption	38
3-3-1- Les différents types des ASI	39
3-3-1-1- Alimentation sans interruption passive	39
3-3-1-2- Alimentation sans interruption interactive	40
3-3-1-3- Alimentation sans interruption triangle	40
3-3-1-4- Alimentation sans interruption à double conversion	41
3-3-2- Principe de fonctionnement de notre procédé.....	42
Conclusion	44

Chapitre VI : Filtrage passif

Introduction.....	45
4-1- Mesure des paramètres de la charge	45
4-1-1-Résultats de mesure	46
4-2- Calcul des paramètres de la charge	49
4-2-1- Calcul des harmoniques du courant	50
4-2-2- Calcul du facteur de déphasage.....	51
4-2-3- Calcul du facteur de déformation	52
4-2-4- Calcul de la puissance déformante	53
4-3- Conception des filtres passifs	53
4-3-1- Calcul des filtres passifs	54
4-3-2- Filtrage d'un harmonique spécifique (monobranche).....	55
4-4- Simulation avec MATLAB	56
4-4-1- Simulation sans filtre	57
4-4-2- Simulation avec implantation d'un filtre au rang 5.....	58
Conclusion.....	59

Chapitre V : Filtrage actif parallèle

Introduction	60
5-1- Schéma synoptique de l'association filtre actif – réseau - charge polluante.....	60
5-2- Modélisation de l'association réseau-filtre actif –charge polluante	61
5-2-1- Modélisation du réseau	61
5-2-2- Modélisation de la charge polluante	61
5-2-3- Structure générale d'un filtre actif parallèle	62
5-2-3-1- Etude de la partie puissance	63
5-2-3-2- Etude de la partie commande	65
5-3- Résultats de simulation	71
5-3-1- Paramètres de simulation.....	72
5-3-2- Résultat de simulation de réseau	72
5-3-3- Résultat de simulation de la charge polluante avant filtrage	73
5-3-4- Modèle de simulation de l'indentification	74

5-3-5- Résultat de simulation de l'identification des courants harmoniques74
5-3-6- Modèle de simulation du filtre actif parallèle.....	.75
5-3-7- Résultat de simulation de la charge polluant après filtrage75
Conclusion76

Introduction

générale

Introduction générale

L'utilisation croissante dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques. Ces problèmes sont dus au fait que ce type de charges absorbe des courants non sinusoïdaux même si elles sont alimentés par des tensions sinusoïdales. Elles se comportent alors comme des générateurs de courants harmoniques. Ainsi, on assiste à une altération, de la part des utilisateurs, des formes d'ondes de courants ou de tensions et par suite à l'augmentation régulière des taux d'harmoniques, ainsi qu'à une importante consommation de la puissance réactive. La circulation de ces mêmes courants perturbés va également provoquer des harmoniques et des déséquilibres de tension, lesquels vont se superposer à la tension nominale du réseau électrique. Ces perturbations ont bien entendu des conséquences néfastes sur les équipements électriques, lesquelles peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt soudain des machines tournantes jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Les solutions classiques de dépollution de réseaux ne répondent plus à l'évolution des réseaux électriques et les charges à protéger. L'utilisation de dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs dits résonnants peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive. Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de la variation de l'impédance du réseau, de la charge et résonnance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonnance est excitée, celle-ci peut entraîner un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau.

Grâce au développement de l'électronique de puissance et les progrès réalisés sur les semi-conducteurs de puissance entièrement contrôlables, de nouvelles structures sont conçues.

La première application réalisée par ces composants de puissance, est les convertisseurs de type alternatif-continu. Plusieurs techniques ont été mises au point pour réduire les pollutions. Les premières applications ont été réalisées avec des redresseurs à indice de pulsation élevé, ensuite avec des redresseurs à modulation de

largeur d'impulsions. Une autre solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif afin d'éviter les inconvénients des filtres passifs. Les filtres actifs de puissance sont basés principalement sur l'onduleur de tension. Ces filtres représentent une solution adéquate du fait que leur réponse est instantanée pour éliminer les harmoniques. Ils sont proposés comme solution avancée de dépollution des réseaux électriques. En effet, ils s'adaptent aussi aux évolutions de la charge sans apporter de modifications aux installations du fournisseur et du consommateur d'énergie.

L'évolution future de ces dispositifs permettra aux fournisseurs d'énergie de les installer eux-mêmes. Ceci en vue d'amortir la propagation des harmoniques causée par la résonance entre les inductances du réseau et les batteries de condensateurs installés dans le but d'améliorer le facteur de puissance et le taux de distorsion harmonique de tension et de courant.

Plusieurs configurations et stratégies de commande du filtre actif peuvent être utilisées. Mais dans notre travail, nous avons choisi d'étudier un filtre actif parallèle qui est destiné au filtrage des courants harmoniques. Comme stratégie de contrôle, nous avons opté pour une régulation à hystérésis.

L'objet de notre travail consiste essentiellement à identifier et filtrer des courants harmoniques générés par une alimentation sans interruption (salle de contrôle dans l'usine de REB).

De manière à mettre en évidence les différentes parties constituant ce mémoire, ce dernier sera divisé en cinq chapitres.

Dans un premier temps, le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les perturbations en courant pouvant intervenir dans un réseau électrique alimentant des charges non linéaires.

Ensuite, dans le second chapitre, nous présenterons les différentes solutions de dépollution (remèdes) pour minimiser les perturbations harmoniques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation d'une alimentation sans interruption.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons la simulation d'un filtre passif.

Le dernier chapitre traitera une simulation d'un filtre actif parallèle.

Chapitre I

Introduction

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions, qui est caractérisé par la fréquence, l'amplitude et la forme d'onde qui doit être sinusoïdale. Mais depuis quelques années, avec le développement de la technologie d'électronique de puissance et son utilisation croissante dans différents appareils industriels, celui-ci engendre de sérieux problèmes de perturbations dans les réseaux électriques. Ainsi, on voit une augmentation régulière du taux de distorsion harmonique, un déséquilibre des courants et une importante consommation de l'énergie réactive, et l'augmentation des pertes d'énergie.

Dans ce chapitre, nous donnerons un petit aperçu sur les harmoniques, ainsi que leurs causes et effets.

1.1. Définition des harmoniques [1]

Les récepteurs non linéaires (fours à arc, éclairages, convertisseurs, redresseurs et onduleurs...etc.) absorbent des courants non sinusoïdaux qui traversent les impédances du réseau et provoquent ainsi une déformation de l'onde de la tension et celle du courant d'alimentation. La déformation de la forme d'onde est caractérisée par l'apparition des fréquences harmoniques.

La distorsion harmonique est une forme de pollution du réseau électrique susceptible de poser des problèmes si la somme de ces courants harmoniques est supérieure à certaines valeurs limites. En général, les fréquences harmoniques prises en compte dans un réseau électrique sont supérieures à 100 Hz et inférieures à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

On définit le rang harmonique comme le rapport de sa fréquence f_h à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad (1.1)$$

1.2. Décomposition d'un signal périodique [2] [3]

Une onde périodique quelconque peut se décomposer en une somme d'ondes sinusoïdales élémentaires de fréquences multiples de la fréquence fondamentale. Ainsi, on distinguera les harmoniques de rangs pairs (2, 4, 6, 8...etc.) et les

harmoniques de rangs impairs (1, 3, 5, 7...etc.). Ces derniers sont les plus courants dans les réseaux électriques industriels. En effet, les harmoniques de rangs pairs s'annulent en raison de la symétrie du signal (figure 1.1).

Grace à cette décomposition, on traite des équations algébriques du type $V=RI+jL\omega I$ (notation complexe) où le paramètre temps n'apparaît pas de façon explicite mais où apparaît $\omega=2\pi f$.

L'intérêt de la décomposition harmonique est de faciliter les calculs de réseau car on dissocie l'étude à 50Hz de celles relatives aux fréquences harmoniques. Donc on traite le problème global en autant de problèmes linéaires qu'il y a de rangs harmoniques.

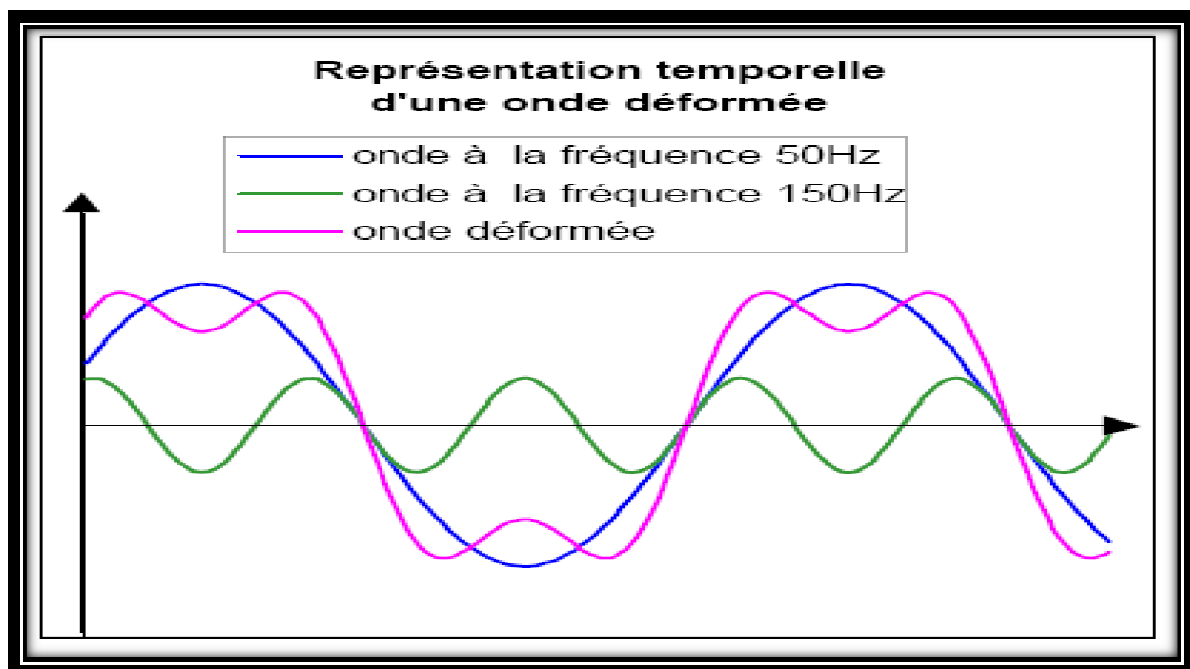


Figure 1.1 : Représentation des différents rangs harmoniques.

1.2.1. Les inter et infra harmoniques

- Inter-harmoniques: Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle du fondamental.
- Infra-harmoniques: Ce 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 certaines machines (commande par train d'ondes, ...).

1.2.2. Représentation spectrale

C'est la représentation graphique de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang.

En général, la valeur de chaque harmonique est exprimée par son taux individuel (en pourcentage du fondamental) figure 1.2.

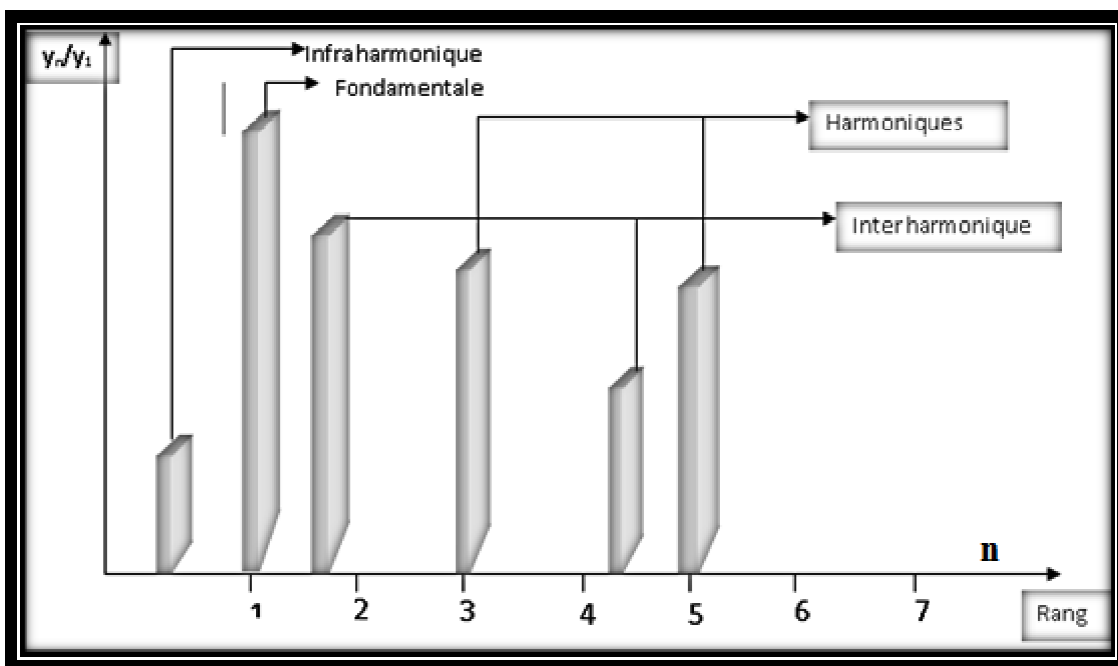


Figure 1.2: Représentation spectrale d'un signal périodique.

1.3. Décomposition d'un signal périodique en série de Fourier [2][3]

Le signal $v(t)$ de la figure 1.1 peut représenter un courant ou une tension périodique de période T , donc de fréquence $f=1/T$ et de pulsation $\omega=2\pi f$.

Ce signal se décompose de la façon suivante :

$$v(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [\alpha \cos(\omega h t) + \beta \sin(\omega h t)] \quad (1.2)$$

Avec :

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1.3)$$

Et pour $h \geq 1$,

$$a_h = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \cos(\omega h t) dt \quad (1.4)$$

$$\beta_h = \frac{2}{T} \int_0^T v(t) \sin(\omega h t) dt \quad (1.5)$$

1.3.1. Valeur efficace d'un signal

La valeur efficace du signal $v(t)$ est par définition :

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} \quad (1.6)$$

D'après le théorème de Parseval

$$\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt = V_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} V_h^2 \quad (1.7)$$

On a donc la relation suivante

$$V_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad V_0=0 \quad (1.8)$$

De même

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.9)$$

NB: La valeur efficace est parfois appelée valeur RMS (Root Mean Square), qui est la notation anglaise

$$I_{\text{eff}} = I_{\text{RMS}} \text{ et } V_{\text{eff}} = V_{\text{RMS}} \quad (1.10)$$

1.3.2. Facteur de crête

Autre facteur déterminant pour identifier un signal déformé : Le facteur de crête. On sait qu'il existe un rapport de $\sqrt{2}$ entre la valeur crête (max) d'une onde sinusoïdale et la valeur efficace du même signal.

$$F_c = \frac{I_{\text{MAX}}}{I_{\text{eff}}} \quad (1.11)$$

Facteurs de crêtes des courants :

- ✓ Charge linéaire c'est $\sqrt{2}$ → absence des harmoniques.
- ✓ Matériels informatiques : 2 à 3 → présence des harmoniques.
- ✓ Variateur de vitesse ≈ 2 → présence des harmoniques.

1.3.3. Les puissances active, réactive, apparente et déformante [2]

a)-La puissance active

C'est la puissance qui se transforme en travail, elle est mesurée en Watt, son expression est donnée par l'équation

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \varphi_h \quad (1.12)$$

$$\varphi_h = \alpha - \beta \quad (1.13)$$

α : Phase initiale de la tension harmonique d'ordre h,

β : Phase initiale du courant harmonique d'ordre h,

φ_h : Déphasage de la tension harmonique d'ordre h sur le courant harmonique d'ordre h.

b)- La puissance réactive

C'est une puissance qui est absorbée dans le réseau et qui ne se transforme pas en travail. Elle est mesurée en VAR et son expression est donnée par l'équation :

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (1.14)$$

c)-La puissance apparente

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

$$S^2 = \sum_{h=1}^{\infty} U_h^2 \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \geq \left(\sum U_h I_h \cos \varphi_h \right)^2 + \left(\sum U_h I_h \sin \varphi_h \right)^2 \quad (1.16)$$

Donc une quantité nommée la puissance déformante est ajoutée par C. Budeanu selon l'équation suivante :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (1.17)$$

La puissance déformante se compose principalement des produits croisés de la tension et du courant harmoniques de différents ordres et sera réduite à zéro si les harmoniques sont réduits à zéro, c'est-à-dire aux conditions sinusoïdales. figure 1.3.

$$D = U_1 \sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2} \quad (1.18)$$

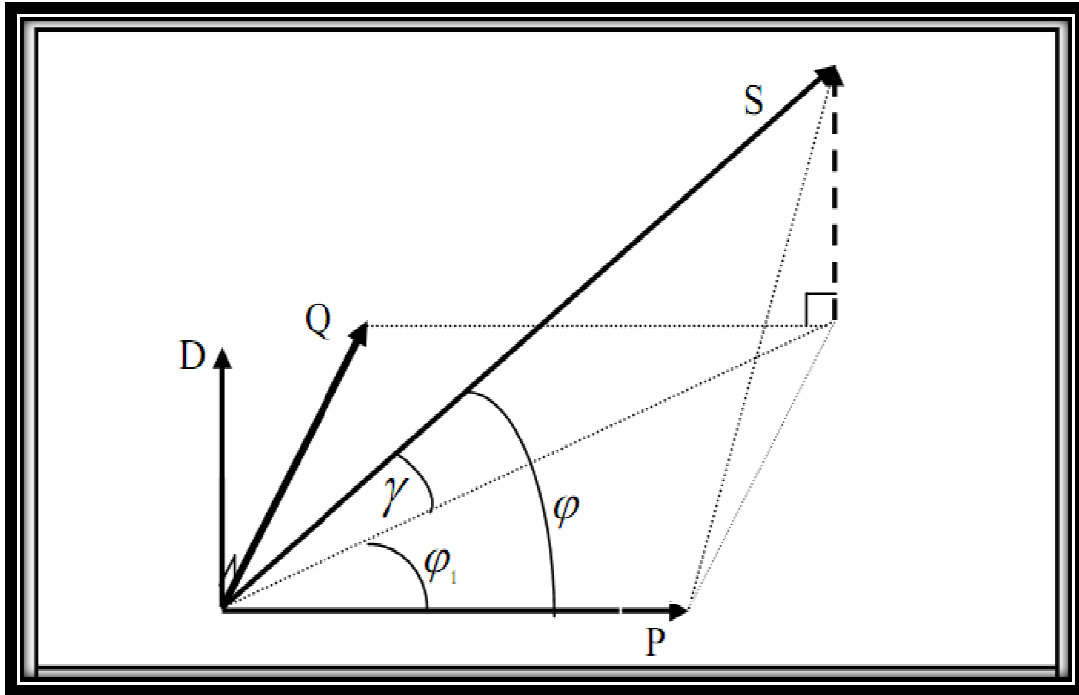


Figure 1.3 : Diagramme de Fresnel des puissances.

1.3.4. Facteur de puissance (F.P)

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi \cdot \cos \gamma \quad (1.19)$$

1.3.5. Taux de distorsion harmonique

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

a)-Taux harmonique de rang h

$$TH_h = \frac{Y_h}{Y_1} \quad (1.20)$$

b)-Le taux global de distorsion harmonique

On caractérise la pollution d'un réseau de manière globale par le taux de distorsion harmonique en tension ou en courant.

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Y_h^2}}{Y_1} \quad (1.21)$$

THD : Taux de distorsion harmonique.

Y_h : Grandeur harmonique.

Y_1 : Grandeur fondamentale.

1.4. Principales origines des harmoniques [4][5]

L'utilisation croissante des équipements informatiques et de l'électronique de puissance à base de thyristors dans les réseaux électriques contribue à la dégradation de la tension d'alimentation et l'apparition des harmoniques.

Les origines principales de ces harmoniques sont les redresseurs triphasés, appareils d'éclairage fluorescents, variateurs de vitesse, téléviseurs, ordinateurs,...etc.

Les harmoniques sont générés par des charges non linéaires dites déformantes qui absorbent un courant non sinusoïdal.

Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques.

Une charge non linéaire (polluante) déforme les signaux électriques du réseau, par conséquent elle produit des courants et tensions harmoniques, contrairement à la charge linéaire. Comme le montrent les figures ci-dessous (figure 1.4.a) et (figure 1.4.b)

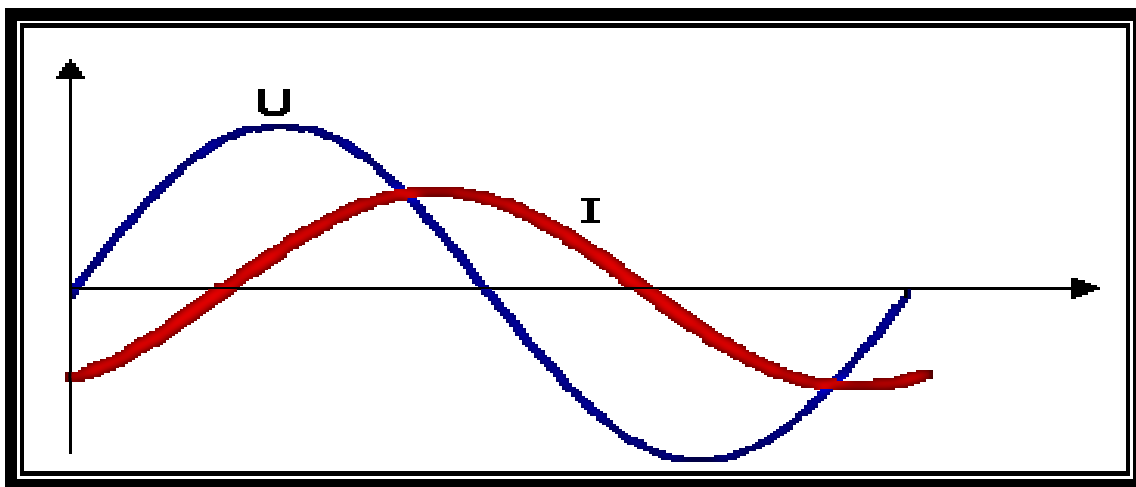


Figure 1.4.a : Charge linéaire.

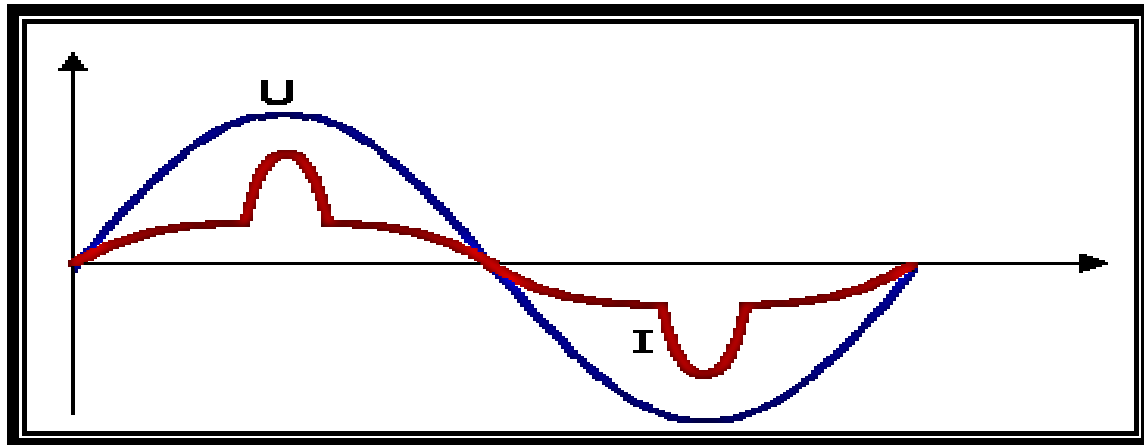


Figure 1.4.b: charge non linéaire.

Le tableau 1.1 ci dessous montre quelques exemples de charges non linéaires fréquemment utilisées dans les réseaux électriques :

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

Tableau 1.1 : Exemples de charges polluantes.

1.5. Types de générateurs d'harmoniques [3][4]

1.5.1. Génération des tensions harmoniques

a)- Alternateurs

Les alternateurs de centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques.

Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale d'onde.

Aussi, un groupe électrogène génère des harmoniques de taux ($< 0.5\%$) à vide et inférieur à (1%) lorsqu'il est en pleine charge sur une charge linéaire.

b)- Transformateurs

Les transformateurs peuvent être des générateurs de tension harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé (le taux de distorsion harmonique est $< 1\%$).

c)- Charges électrodomestiques

Ce terme englobe tous les appareils domestiques de faible puissance tels que les récepteurs de télévision, les magnétoscopes, etc... Ces charges sont présentes en grand nombre sur le réseau et, bien que de puissance unitaire réduite, elles sont responsables d'une part importante de la pollution harmonique.

1.5.2. Générateurs de courants harmoniques [2]

a)- Moteur asynchrone

Les perturbations harmoniques dans ces machines sont dues aux courants magnétisants, aux fréquences de dentures ainsi qu'au glissement de la machine asynchrone.

b)-Alimentation sans interruption ASI

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. Elles alimentent généralement des charges non linéaires comme le matériel informatique.

Les limitations proviennent, d'une part, de la puissance de court-circuit disponible en aval de l'onduleur et d'autre part, de la qualité de la sinusoïde produite par le montage onduleur, en sortie de l'ASI.

c)-Convertisseurs d'électronique de puissance

Comme les :

Redresseurs monophasés (micro-ordinateurs, imprimantes et périphériques d'ordinateurs, variateurs de vitesse pour les moteurs à courant alternatif, téléviseurs...etc.).

- Gradateurs à angle de phase (commande de four électrique, régulation de puissance, démarreurs progressifs des moteurs ...etc.).
- Redresseurs triphasés à base de semi- conducteurs (variation de vitesse de moteur, four à induction, électrolyseurs ...etc.).

d)-Eclairage

On distingue deux types de lampes qui produisent des courants harmoniques :

- Les lampes à fluorescence.
- Les lampes à vapeur haute pression.
- Les lampes fluo-compactes.

La génération d'harmoniques dans ces lampes est liée à la nature fortement non linéaire du phénomène entraînant l'illumination ainsi qu'à la présence d'un ballast.

e)-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.

Certaines perturbations harmoniques sont dues essentiellement aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs, saturation des circuits magnétiques...etc.).

1.6. Effets des harmoniques sur le réseau électrique [2][3]

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction de condensateurs et de disjoncteurs sous l'effet de forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Ce phénomène est généralement observable sur des réseaux internes d'usines alimentant des convertisseurs statiques.

Un autre phénomène de plus en plus rencontré est l'échauffement des transformateurs

et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 et multiples de 3. On rencontre le plus souvent ce type de situation en milieu tertiaire, en raison de la multiplication des matériels informatiques monophasés.

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques inférieures à 5% de la tension fondamentale ne produisent pas d'effets notables. Entre 5% et 7%, on commence à observer des effets, de 7% à 10% ces effets sont fréquents, et pour plus de 10%, les effets sont quasiment certains.

1.6.1. Les différents types d'effets

On distingue deux grands types d'effets : Effets instantanés et effets à long terme.

a)-Effets instantanés

- Les perturbations des systèmes électroniques.
- Déclenchements intempestifs des protections.
- Perturbation des lignes de téléphone proches des lignes de puissance.
- Résonance.
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (moteurs, transformateurs...)
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
- Perte de précision des appareils de mesure.

b)-Effets à long terme

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements.
- Echauffement des sources : transformateurs, alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer.....).
- Fatigue mécanique (pulsation de couple dans les machines asynchrones...).
- Echauffement des récepteurs, des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques.
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs...)
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire.....).

- Ils réduisent le couple utile des moteurs et les empêchent d'atteindre la vitesse nominale.

1.6.2. Effets des harmoniques sur les appareils électrotechniques [3]

a)-Machines tournantes

Les machines synchrones ou asynchrones, même alimentées par des courants parfaitement sinusoïdaux, sont elles-mêmes génératrices d'harmoniques à cause de la saturation du circuit magnétique, d'où la répartition spatiale du flux tournant dans l'entrefer qui n'est pas rigoureusement sinusoïdal.

- **Machine synchrone**

Les courants harmoniques générés dans le réseau provoquent des échauffements dans les machines synchrones dus aux pertes cuivre et aux pertes fer. Ces effets sont limités lorsque la machine ne tourne pas à pleine charge.

Dans une machine synchrone le rotor et le champ tournant tournent à la même vitesse de synchronisation (300tr /min pour une machine à une paire de pôles) mais le champ harmonique tourne à une vitesse différente car les harmoniques de rang $(3k-1)$ créent un flux tournant dans le sens inverse à la vitesse $(3k-1) \omega$, donc à la vitesse $3k\omega$ par rapport au rotor et en sens inverse de celui-ci. Les harmoniques de rang $3k+1$ créent aussi un flux tournant dans le sens direct à la vitesse $(3k+1) \omega$, donc à la vitesse $3k\omega$ par rapport au rotor et dans le même sens que celui-ci.

En ce qui concerne les moteurs, on doit éviter les alimentations dont le taux d'harmoniques de tension dépasse 10%. Au delà, le rendement de la machine est fortement affecté. Par ailleurs, les harmoniques peuvent engendrer des bruits, des pertes rotoriques, des échauffements et des vibrations inacceptables.

- **Machines asynchrones**

Le passage des courants harmoniques dans les enroulements statoriques du moteur asynchrone crée des couples moteurs s'il s'agit de systèmes directs $(3k+1)$ ou des couples antagonistes s'il s'agit de systèmes inverses $(3k-1)$.

Ces couples sont généralement négligeables devant le couple du moteur.

A cause des harmoniques, ce courant devient :

$$I \cong I_n \sqrt{1 + \sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{U_h}{h \cdot U_n} \right)^2} \quad (1.22)$$

U_n : Tension nominale.

U_h : Valeur de la tension de l'harmonique h.

I_n : Courant statorique nominal.

Les pertes Joule au stator augmentent sensiblement comme $(I / I_n)^2$.

Les pertes Joule au rotor sont plus affectées par les harmoniques que celles au stator car la résistance du rotor croît rapidement en fonction de la fréquence des courants qui y sont induits.

Aussi, la norme CEI 892, qui définit les limites à respecter pour les moteurs asynchrones, utilise le taux d'harmoniques pondéré défini par :

$$TDH_M = \frac{1}{U_1} \left(\sum_{h=2}^{\infty} \frac{U_h^2}{h} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.23)$$

Pour les moteurs ordinaires, ce taux doit être inférieur à 2%.

Une règle pratique consiste, comme les moteurs synchrones, à ne pas dépasser un taux d'harmoniques en tension de 10% pour l'alimentation du moteur asynchrone.

1.6.3. Effets des harmoniques sur les composants passifs [2]

a)-Transformateur de puissance

Dans un transformateur la présence d'harmoniques produit trois types d'effets :

- **Augmentation des pertes**
 - Augmentation des pertes par courants de Foucault.
 - Augmentation des pertes par effet hystérésis dans le noyau magnétique.

- Augmentation des pertes Joule dans les enroulements qui sont aussi accrues car la valeur efficace des courants est supérieure à celle de leur seul fondamental.

- **Augmentation du bruit**

Les courants harmoniques peuvent générer des forces électrodynamiques venant exciter des fréquences propres de la structure mécanique que constitue l'ensemble du transformateur, les vibrations dues à de telles résonances mécaniques se traduisent par une augmentation plus ou moins importante du bruit acoustique. Celui-ci est l'indice d'une fatigue mécanique anormale.

- **Création de surtension interne**

Des surtensions peuvent apparaître au sein même du transformateur dans des cas très particuliers de fonctionnement des convertisseurs qu'il alimente. Elles sont dues à des harmoniques anormaux ou à des inter harmoniques non filtrés à leur sortie des convertisseurs.

b)-Condensateur

En présence de charges non linéaires générant des harmoniques, il est nécessaire de surdimensionner les condensateurs en tension, ils doivent résister à une tension efficace (tenant compte des tensions harmoniques) égale à 110% de la tension nominale fondamentale du condensateur.

Du fait même de l'importance de leur rôle dans la limitation de la propagation des harmoniques, les condensateurs peuvent être soumis à des contraintes importantes liées aux harmoniques :

- En dérivant les courants harmoniques, il augmente la valeur efficace qui les traverse.
- En produisant involontairement ou volontairement, dans le cas de filtrage, des phénomènes de résonance, ils augmentent la tension à leurs bornes.

c)-Câbles de puissance

La circulation des courants harmoniques dans un câble électrique augmente la valeur efficace du courant, qui se traduit par des pertes Joule selon la loi d'ohm suivante :

$$P = R * I_{eff}^2 = R \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \quad (1.24)$$

En outre, les courants admissibles varient en fonction des déséquilibres et des courbes de charge.

1.7. Les principaux phénomènes rencontrés

1.7.1. Le phénomène de résonance [3]

Les phénomènes de résonance proviennent de la présence d'éléments capacitifs et inductifs sur le réseau d'alimentation électrique (impédances de la source, capacité de relèvement du facteur de puissance), générant ainsi des amplitudes élevées sur certains rangs harmoniques (rangs 5 et 7).

Lorsque les courants harmoniques ont une fréquence correspondante à la fréquence de résonance des circuits LC existants, il peut en résulter une augmentation de la tension harmonique et ceci, en raison de l'impédance élevée pour ce rang harmonique. La tension harmonique voit alors sa valeur augmenter suivant la loi d'Ohm, affectant ainsi le tension du réseau d'alimentation électrique.

1.7.2. Les échauffements dans les conducteurs et l'équipement électrique [6]

Les conducteurs électriques véhiculent les courants harmoniques qui produisent par effet Joule un échauffement des conducteurs au même titre que le courant fondamental. Malheureusement, les harmoniques ne contribuant pas au transfert de la puissance active, ils créent uniquement des pertes électriques et participent à la dégradation du facteur de puissance de l'installation.

Les condensateurs sont particulièrement sensibles à la circulation des courants harmoniques du fait que leur impédance décroît proportionnellement au rang élevé des harmoniques en présence dans le signal déformé.

La charge non linéaire crée des courants harmoniques qui circuleront d'autant plus facilement par le condensateur de compensation de l'énergie réactive que leur rang sera élevé, comme le montre l'équation suivante :

$$X_c = \frac{j}{C*\omega} \quad (1.25)$$

Le condensateur subit un échauffement excessif qui risque de conduire à sa destruction ou la fusion du fusible de protection, généralement placé en série.

1.7.3. Les facteurs crêtes élevés

Des déclenchements intempestifs des dispositifs magnétiques des disjoncteurs pouvant se produire, notamment dans le domaine des installations tertiaires comprenant un parc de matériel informatique important, sont bien souvent dus aux problèmes de pollution harmonique.

En effet, les disjoncteurs assurant la protection des installations électriques comprenant des matériels informatiques voient leur seuil de sensibilité atteint lors des pointes de courant engendrées par les signaux déformés ayant des facteurs crête importants.

1.7.4. Les effets dans le conducteur neutre

En régime sinusoïdal, dans le cas d'un système triphasé équilibré, tant du point de vue de la source que de celui des récepteurs eux-mêmes, la somme vectorielle des courants s'annule au point neutre. Ainsi, il n'y a pas de circulation de courant dans le conducteur neutre. La norme autorise alors un sous-dimensionnement du conducteur neutre vis-à-vis des phases afin de réaliser une économie de cuivre.

Le signal déformé issu d'une charge non linéaire comprend plusieurs composantes harmoniques de fréquences multiples. Si l'on s'intéresse à la somme des harmoniques de rangs multiples de 3 pour les trois phases : rang 3, rang 9 etc, on s'aperçoit que cette somme ne donne pas lieu à une annulation du courant dans le conducteur neutre.

La valeur efficace de l'intensité de ce courant de neutre est tout simplement égale à la somme arithmétique des trois courants harmoniques de rang 3 issus de chacune des phases. Ceci est encore valable dans le cas d'un système équilibré.

Conclusion

Dans ce chapitre on s'est intéressé à la présentation des généralités sur les harmoniques et leurs effets néfastes sur les équipements électriques, qui causent parfois la destruction totale de ces équipements.

Dans le chapitre suivant on présentera les solutions possibles afin de limiter la propagation et l'effet de ces harmoniques.

Chapitre II

Introduction

Vus les nombreux effets néfastes créés par les harmoniques sur les appareils électriques industriels, plusieurs solutions ont été envisagées afin de pouvoir garantir un niveau de qualité et de sécurité suffisant à l'ensemble de l'installation. Mais avant d'envisager de mettre en place une solution de filtrage pour dépolluer le réseau, il faut d'abord s'intéresser au mode de raccordement du récepteur non linéaire vis-à-vis de l'installation concernée et vis-à-vis des autres charges présentes sur le même réseau.

2. Solutions de dépollution des harmoniques

2.1. Les techniques classiques de filtrage

2.1.1. Choix du raccordement des charges polluantes au réseau [2] [7]

En effet, le branchement de la charge non linéaire doit être réalisé, si possible, sur la source présentant l'impédance la plus faible, par exemple, le transformateur le plus puissant. Lorsque l'impédance de source est faible, la puissance de court-circuit est importante, ce qui réduit les problèmes dus aux harmoniques.

Les charges polluantes aussi doivent être raccordées le plus en amont possible de la source afin de bénéficier du niveau le plus élevé de puissance de court-circuit, (figure 2.1). D'autre part, il faut éviter de raccorder un récepteur sensible à proximité d'une charge déformante.

La position du branchement des charges déformantes au sein d'une installation revêt, ainsi, un double intérêt : assurer la séparation des charges et bénéficier de la puissance de court-circuit la plus élevée. La séparation des sources est aussi une solution employée, bien que coûteuse. Elle consiste à attribuer un transformateur indépendant pour l'alimentation unique de la charge non linéaire.

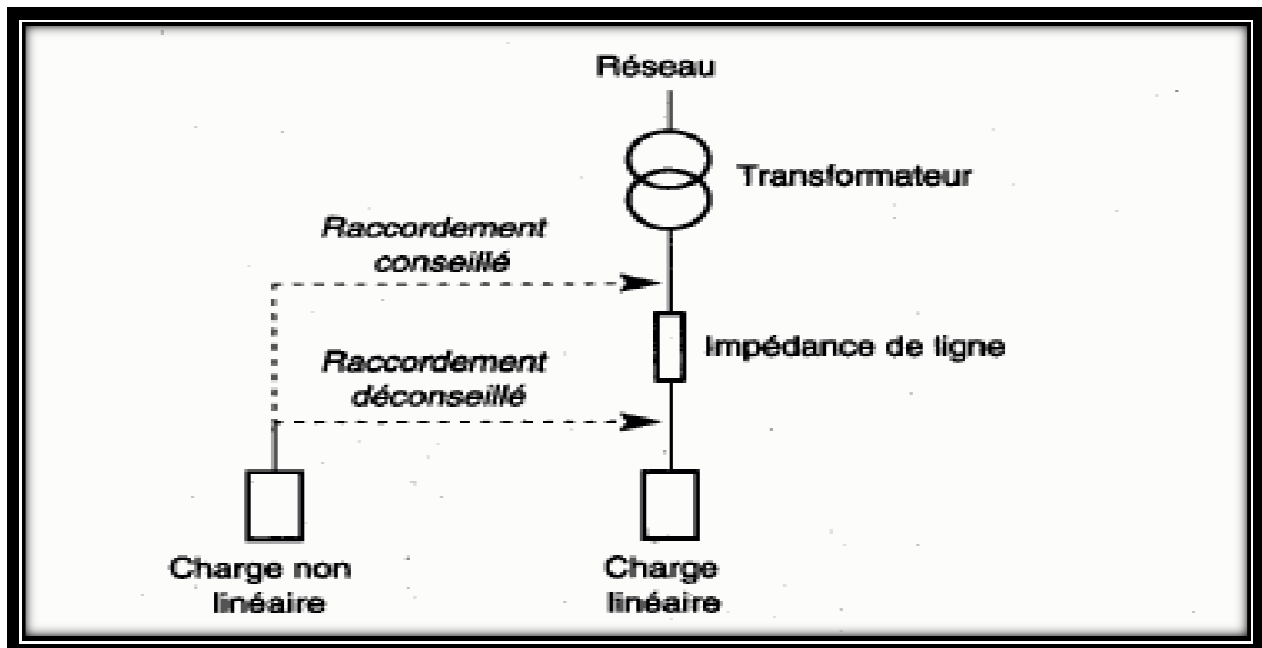


Figure 2.1 : Raccordement de la charge polluante le plus en amont possible de la source.

2.1.2. Couplage spécial de transformateurs [7]

Les harmoniques de rang 3, émis principalement par des charges non linéaires alimentées en monophasé (charges informatiques, ballasts d'éclairage, etc.), sont, en général, bloqués au niveau du circuit aval au transformateur.

Du fait de leur couplage étoile-zigzag ou triangle-étoile, les transformateurs HTA/BT représentent une barrière contre les harmoniques de rang 3.

La mise en place d'un transformateur de séparation, dans le cas d'une installation tertiaire, par exemple, composée de nombreux ordinateurs et matériels informatiques, peut constituer une solution efficace pour éliminer les harmoniques de rang 3 et multiples de 3. Mais elle n'a, cependant, aucun effet sur les autres rangs harmoniques (H5, H7, etc...). Au contraire cette solution limite la puissance disponible de la source, et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques.

2.1.3. Utilisation d'un redresseur à deux ponts [7]

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux enroulements secondaires. Chacune de ces sorties alimentant un redresseur en pont de Graëtz qui réalise un redressement hexaphasé. Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques. Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés. C'est le cas en particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel. Cette solution est onéreuse, elle entraîne un coût supplémentaire et demande plus que le savoir faire habituel pour les mettre en œuvre, figure 2.3.

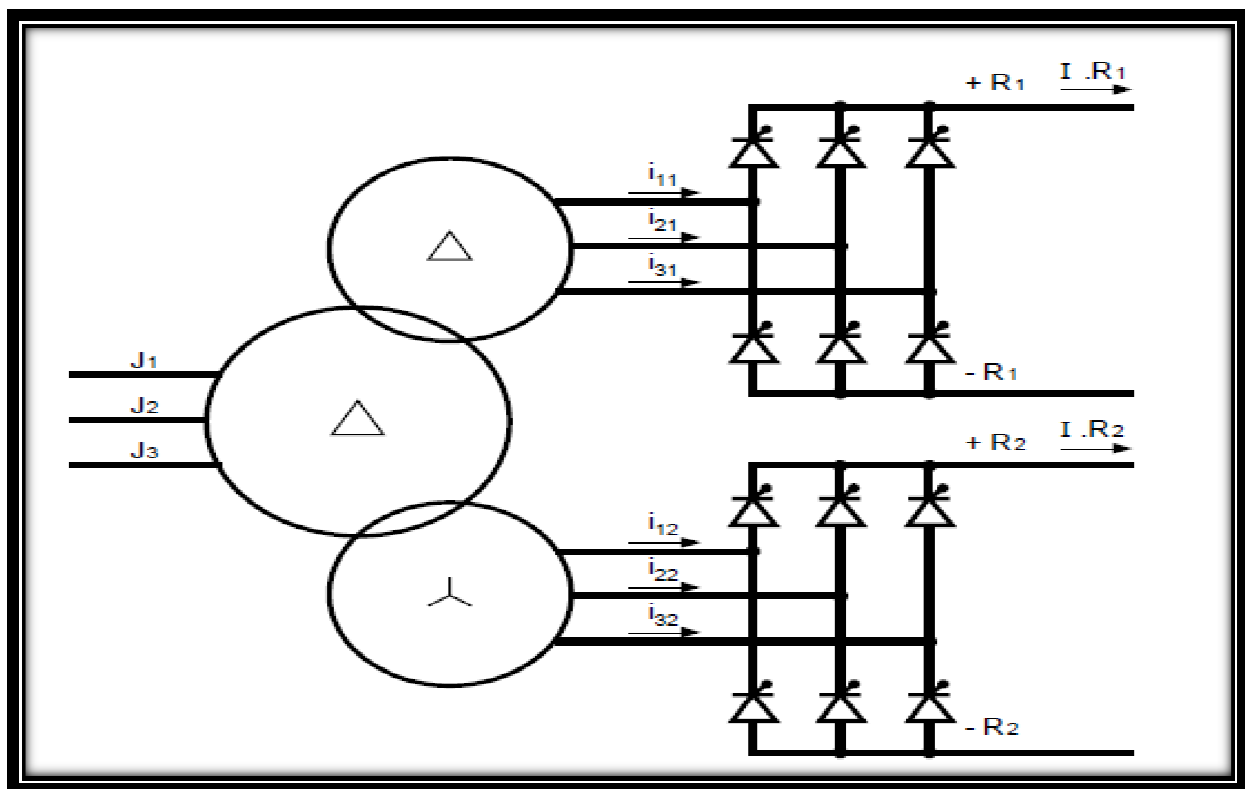


Figure 2.3 : Schéma de principe d'un redresseur à deux ponts décalés.

2.1.4. Inductances (selfs) série [8]

D'autres solutions sont utilisées, notamment dans les convertisseurs d'énergie de type onduleurs ou variateurs de vitesse, mettant en œuvre une inductance en série avec le récepteur déformant (on parle dans ce cas d'inductance de ligne). L'inductance, dont l'impédance augmente avec la fréquence, conduit à réduire les amplitudes des harmoniques de rangs élevés. Lorsque cette inductance est placée en amont du convertisseur polluant, on observe une diminution sensible des courants harmoniques générés par l'équipement sur le réseau d'alimentation électrique et par conséquent, du taux de distorsion harmonique en tension.

2.1.5. Renforcement de la puissance de court-circuit

Plus la puissance de court circuit de la source S_{cc} est élevée plus la fréquence de résonance s'éloigne des fréquences harmoniques dangereuses.

2.2. Les nouvelles techniques de filtrage

2.2.1. Filtrage passif [3]

Un certain nombre de solutions ont été développées pour désensibiliser les installations industrielles vis-à-vis de la pollution harmonique.

Actuellement 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 dévier les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie.

2.2.1.1. Inductance anti-harmonique [10]

Cette solution, utilisée pour la protection des condensateurs de relèvement du facteur de puissance, consiste à placer en série avec le condensateur une inductance appelée inductance anti-harmonique. La valeur de la fréquence de résonance de l'ensemble du montage doit être placée en dessous des valeurs de fréquences harmoniques présentes, protégeant ainsi le ou les condensateurs de compensation d'énergie réactive contre les

surcharges harmoniques. Le fabricant ABB préconise la valeur de 210 Hz. L'emploi d'une inductance anti-harmonique présente alors un double intérêt :

- Elle supprime les risques de claquage de condensateurs dus aux forts courants harmoniques (rappelons que l'impédance du condensateur diminue avec l'augmentation de la fréquence).
- Elle réduit les taux de distorsion harmonique en tension sur le réseau considéré. La fréquence d'antirésonance est placée elle aussi en dehors du domaine des courants harmoniques présents sur ce réseau et l'on doit veiller également à ce que cette fréquence ne corresponde pas à une fréquence de télécommande du distributeur (fréquence de 175 Hz par exemple).

La batterie de condensateurs assure ainsi, pour la fréquence fondamentale (50 Hz), la fonction de compensation d'énergie réactive, tandis que l'impédance élevée de l'inductance limite l'amplitude des courants harmoniques. Comme ce type de filtre présente une résonance parallèle (antirésonance) avec l'inductance du réseau sur lequel il est raccordé, on l'accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique (250Hz, en général). Voir la figure 2.4.

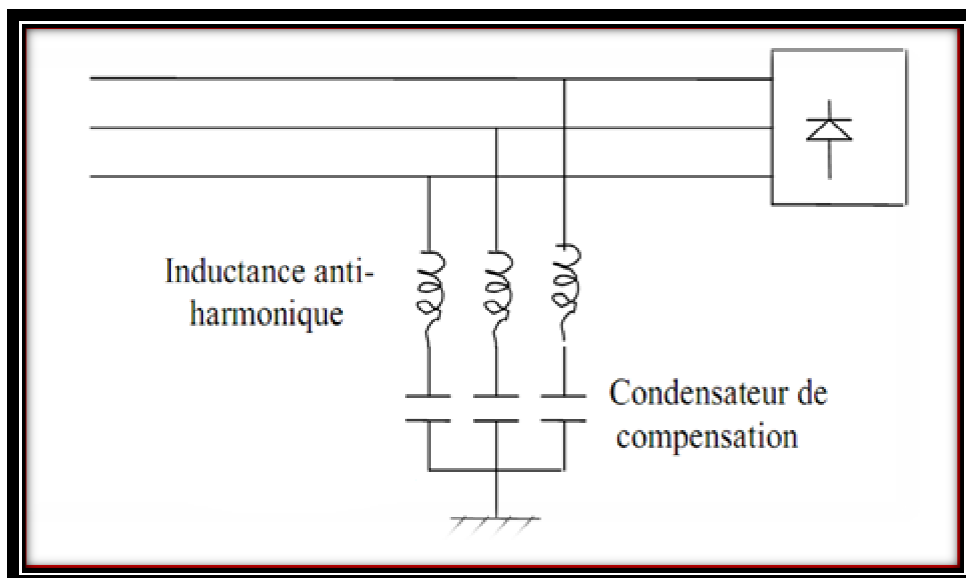


Figure 2.4: Raccordement d'une inductance anti-harmonique.

2.2.1.2. Filtre résonant [10]

A l'inverse d'une inductance anti-harmonique, un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique.

Sa constitution est semblable à celle d'un ensemble inductance anti-harmonique plus condensateur de compensation, (figure 2.5).

Trois différences existent, cependant:

- Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé, l'accord du filtre est donc très pointu.
- Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonants.
- Un filtre est calculé au cas par cas alors qu'une inductance anti-harmonique est un élément standard.

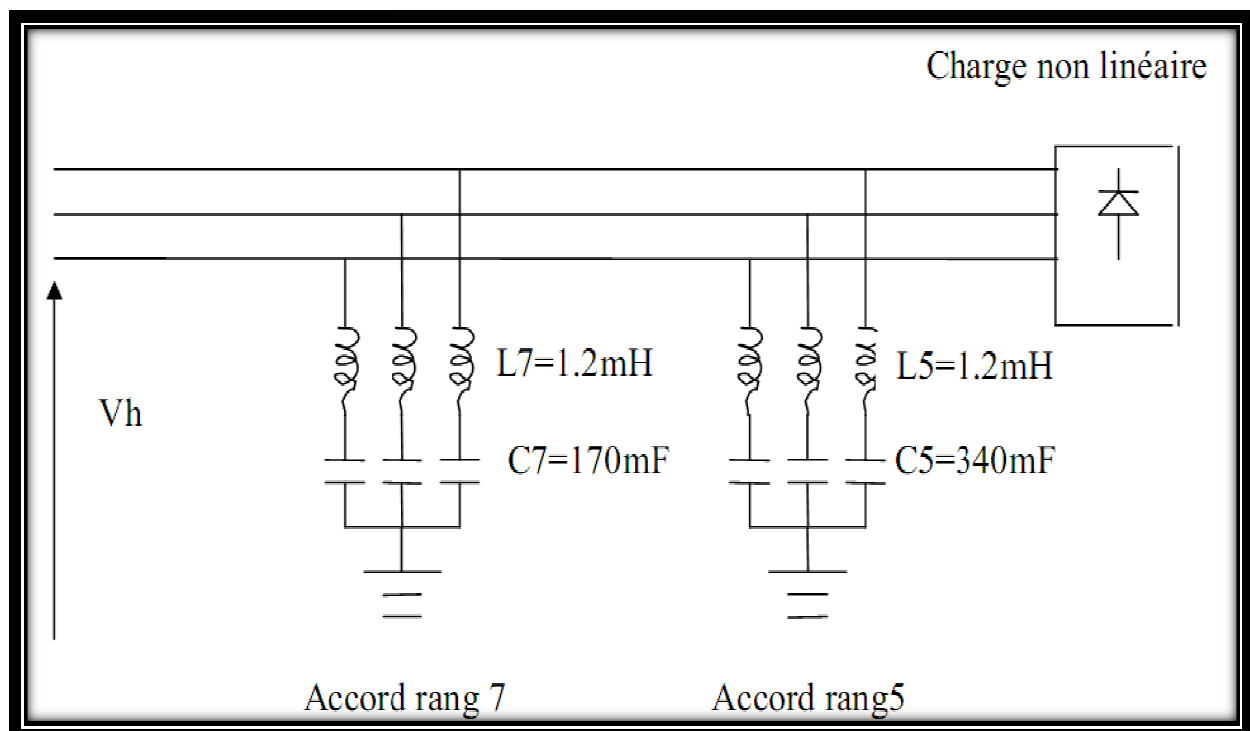


Figure 2.5: Installation d'un filtre résonant

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.

L'installation d'un filtre résonant donne naissance à une impédance harmonique dont l'allure est représentée par la figure 2.6. La fréquence d'accord correspond au rang harmonique 5.

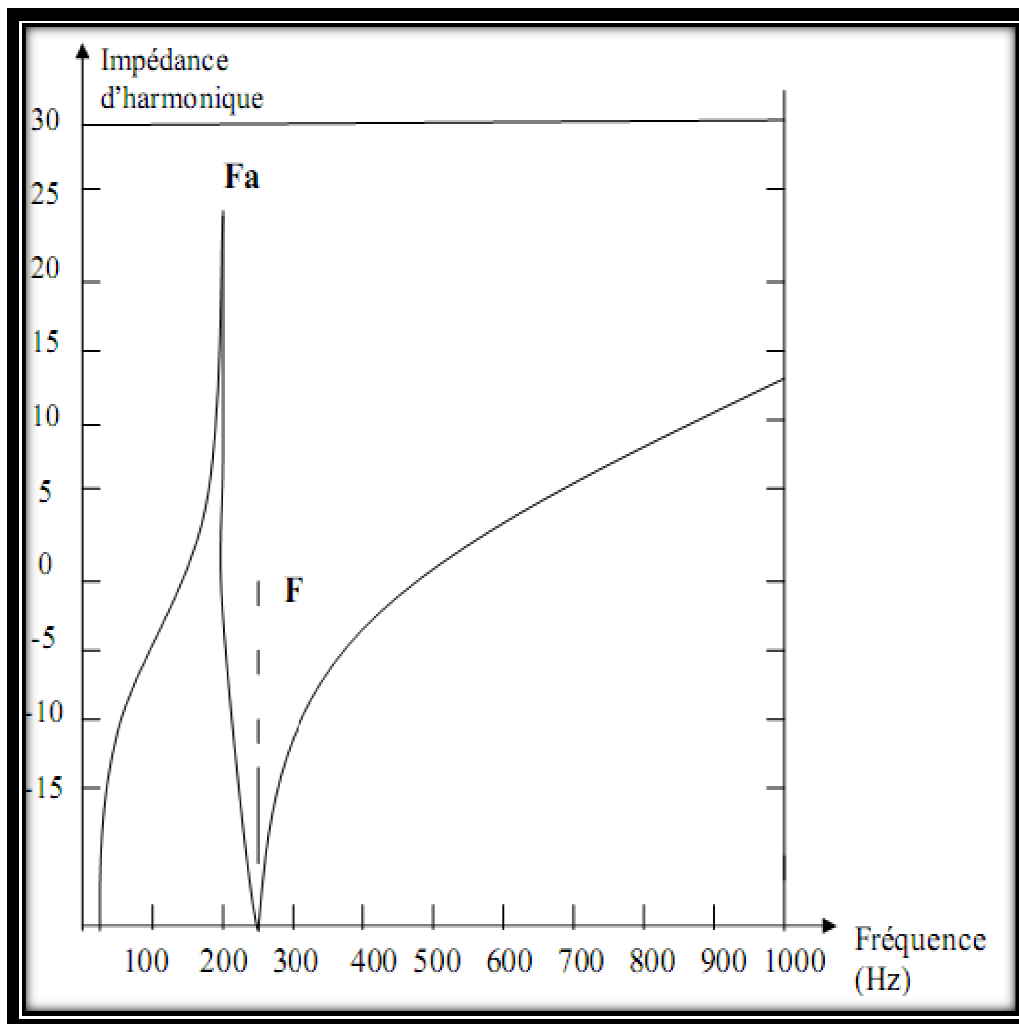


Figure 2.6: L'allure d'une impédance harmonique.

Dans le cas présent, la fréquence d'accord correspond au rang 5, c'est-à-dire 250Hz, on remarque qu'à la fréquence de résonance, l'impédance est très faible; ce qui dérive les courants harmoniques vers le filtre.

A une fréquence légèrement inférieure à la fréquence de résonance, on observe un accroissement important, une résonance parallèle dite anti-résonance. Cette dernière est due à l'impédance du filtre Z_f en parallèle avec l'impédance de la source Z_s .

Lorsqu'on veut filtrer un rang harmonique élevé, il faut toujours prendre garde à ce que l'anti-résonance n'amplifie pas les rangs harmoniques les plus faibles ; c'est pourquoi, lorsqu'on utilise des filtres accordés sur des rangs harmoniques différents, par exemple 5, 7, 11, leur mise en service doit se faire par ordre croissant aux rangs harmoniques filtrés et inversement lors de la mise hors service.

La présence de résonance au sein d'un réseau électrique entraîne un certain nombre de risques vis-à-vis des perturbations harmoniques.

Cala signifie qu'en cas de résonance parallèle dans un réseau, les condensateurs peuvent être soumis à de fortes tensions harmoniques et se détériorer. Cette situation est typique d'un réseau de distribution ou d'un réseau interne d'usine où la source de courant est une installation d'électronique de puissance.

La performance d'un filtre résonnant est caractérisée par la tension harmonique entre ses bornes V_{fh} . Cette tension se calcule à partir du courant harmonique I_{hf} traversant l'impédance du réseau Z_s en parallèle avec l'impédance Z_f du filtre, calculées à une fréquence h fois celle du fondamental :

$$V_{fh} = \frac{Z_f \cdot h \cdot Z_s}{Z_f + h \cdot Z_s} I_{dh} \quad (2.1)$$

Comme $Z_f \ll h Z_s$, on obtient:

$$V_{fh} = Z_f I_{dh} \quad (2.5)$$

Le filtre sera plus performant avec Q grand et δ Faible. Il faut noter qu'il existe toujours une anti résonance pour un range h_a inférieur à celui de l'accord due à l'inductance L_s du réseau.

$$h_a = \sqrt{\frac{1}{(L_s + L)C\omega_1^2}} \quad (2.6)$$

Les filtres passe-haut, beaucoup moins sélectifs, atténuent les harmoniques supérieurs, voisins de leur rang d'accord. La figure 2.6 représente l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence. Avec un amortissement plus important, les filtres passe-haut présentent des performances moins bonnes que celles des filtres résonnants. En revanche, les conséquences d'une variation de la capacité ou de la fréquence sont plus limitées.

2.2.1.3. Filtre amorti [3]

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On l'utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre, et non une fréquence particulière. Le schéma monophasé équivalent de l'installation d'un tel filtre est montré par la figure 2.7 ci-dessous.

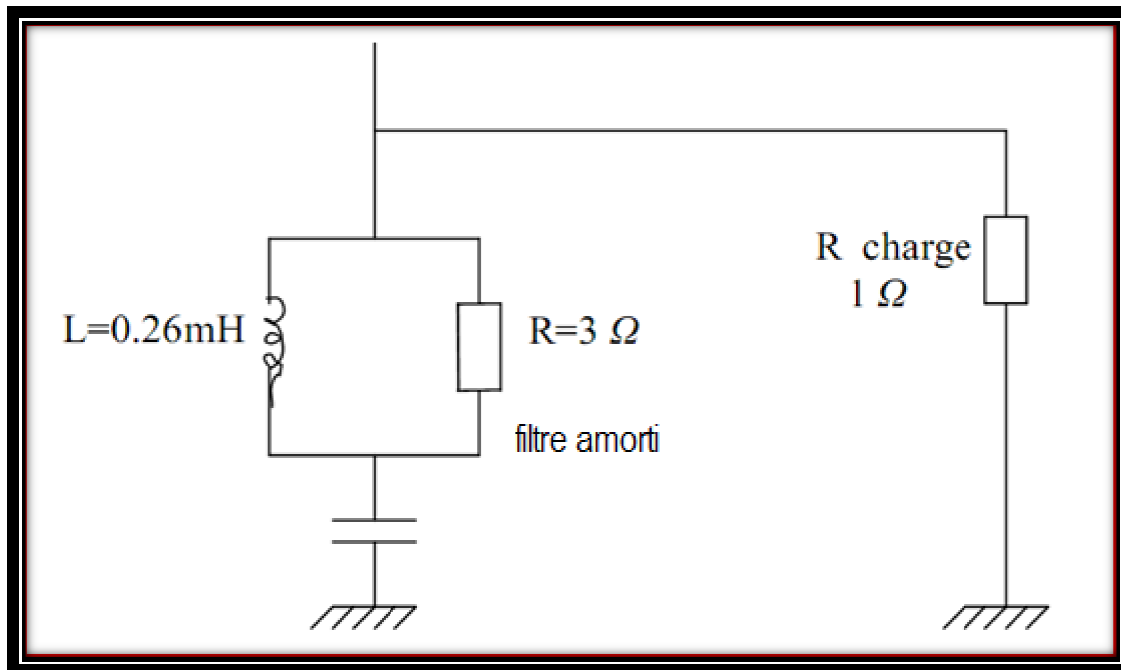


Figure2.7: Raccordement d'un filtre amorti.

Il est moins sensible aux variations de ses éléments (capacité, inductance et résistance) qu'un filtre résonant. La résistance d'amortissement influe légèrement sur la fréquence d'accord. Les filtres amortis d'ordre 2 sont les plus répandus. Il existe également des filtres amortis d'ordre 3 qui comportent deux éléments capacitifs par phase au lieu d'un.

2.2.2. Filtre actif [10][12]

Le filtrage actif constitue aujourd'hui une solution plus sophistiquée que le filtrage passif, bénéficiant des technologies les plus performantes et constamment améliorées par les constructeurs de ces équipements.

Le principe de fonctionnement du filtre actif réside dans le fait que celui-ci produit des courants qui s'opposent aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires, tendant ainsi à rétablir un courant appelé par la charge, quasi sinusoïdal.

Ces filtres actifs, encore appelés compensateurs actifs, sont utilisés en parallèle ou en série au sein d'une installation nécessitant un traitement harmonique. Le filtre actif est

d'une utilisation plus large que le filtre passif puisqu'il peut compenser plusieurs rangs harmoniques à la fois.

2.2.2.1. Filtre actif série

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmoniques) venant du réseau et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale, (figure 2.8).

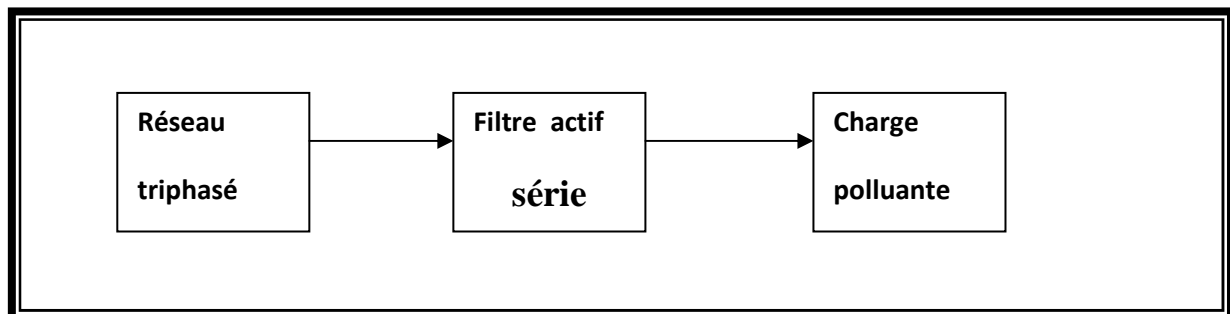


Figure 2.8: Schéma d'un filtre actif série.

2.2.2.2. Filtre actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau comme le montre la figure 2.10 est souvent le plus recommandé, comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant, côté réseau, est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau.

Cette structure est plus répandue que celle du filtre actif série du fait des innombrables modes de compensation qu'elle offre :

- Compensation des courants harmoniques.
- Compensation de la puissance réactive.
- Compensation des tensions harmoniques.

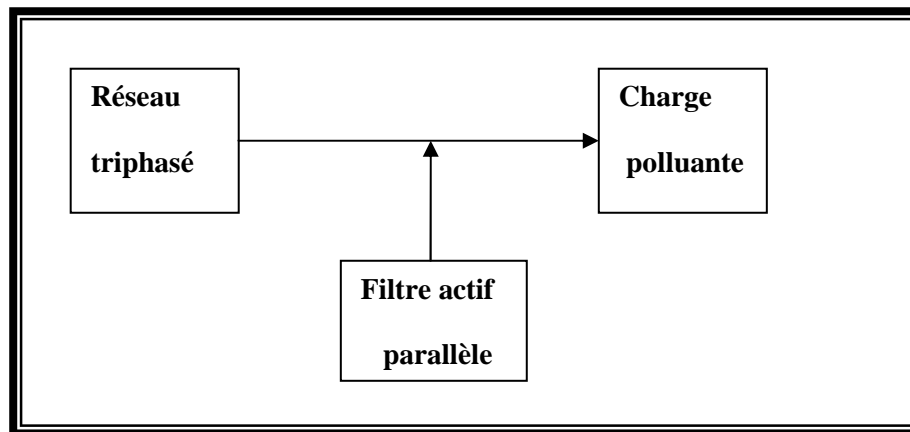


Figure 2.10: Schéma d'un filtre actif parallèle.

➤ Avantages du filtre actif [3]

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques.
- Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. Il limite sa mission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun risque de destruction.
- Le risque de résonance entre filtre et impédance du réseau, qui existe avec le filtre passif, est supprimé.

Un compensateur actif peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par la charge polluante. De même, un compensateur actif de tension de type série peut protéger des condensateurs ou des filtres passifs contre une distorsion de tension provenant du réseau amont.

La compensation de l'énergie réactive à 50Hz est certes possible, mais elle est coûteuse, par rapport à une solution passive. Le filtrage actif est donc le plus intéressant sur les charges qui ne nécessitent pas de compensation.

2.2.3. Comparaison entre filtrage passif et filtrage actif

Le tableau 2.1 suivant présente quelques éléments de comparaison.

Critère	Filtre actif	Filtre passif
Interaction entre filtres voisins	Pas de risque	Risque de destruction des filtres accordés à des fréquences voisines
Rangs harmoniques compensés	Tous les rangs harmoniques dans sa bande passante	En général, un filtre passif par rang harmonique à compenser
Surcharge	Pas de risque	Risque de destruction lorsque le courant harmonique à compenser dépasse son dimensionnement
Modification du réseau (variation d'impédance)	Pas d'influence sur les performances	Risque d'amplification des harmoniques (déplacement de la fréquence de résonance vers une fréquence harmonique)
Vieillessement	Pas d'influence	Risque de dégradation des performances (dérive de fréquence d'accord)
Raccordement	Etude préalable simplifiée	Etude au cas par cas parfois complexe
Surveillance de fonctionnement	Réalisé par le système de contrôle-commande	Pas de surveillance particulière
Coût	Coût du filtre plus élevé Faible coût d'étude de dimensionnement	Coût du filtre plus faible Etude de dimensionnement parfois complexe et obligatoire

Tableau 2.1: Comparaison entre filtrage passif et filtrage actif.

2.2.4. Combinaison hybride actif et passif [8] [10]

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif avec un filtre un actif. Ces structures permettent d'optimiser le rapport performance coût et d'avoir une meilleure tenue en tension.

Dans ce cas, le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient la performance de filtrage en fonction de l'évolution de la charge.

2.2.4.1. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Dans ce cas les filtres passifs absorbent une grande partie des courants harmoniques créés par la charge non linéaire, et les filtres actifs fournissent une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant de la source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire,(figure 2.11).

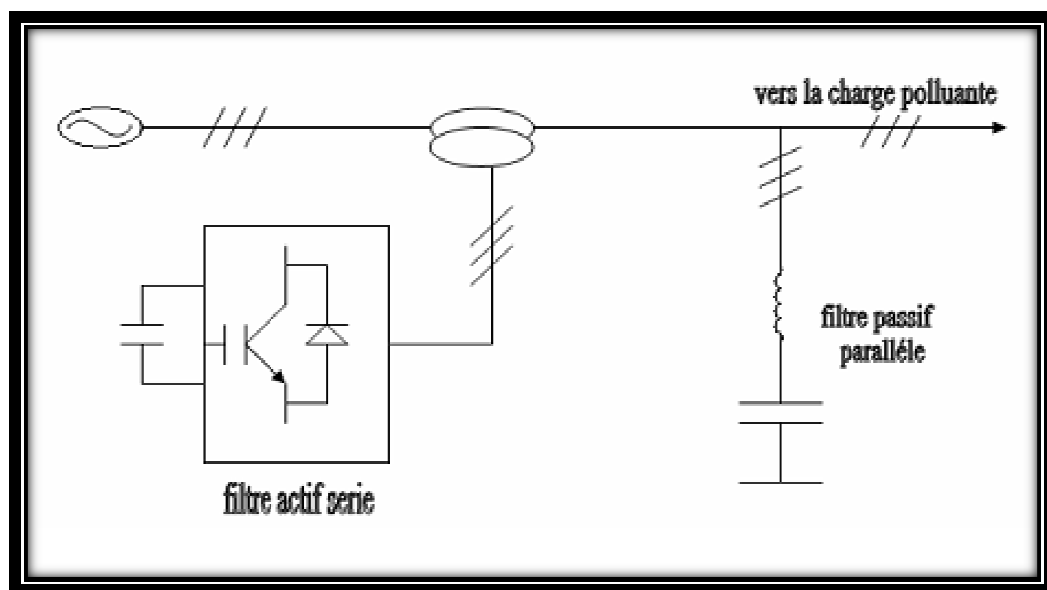


Figure 2.11: Filtre actif série et filtre passif parallèle.

2.2.4.2. Filtre actif et filtres passifs en parallèles avec la charge

Le principe de fonctionnement de cette configuration, est le 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. De plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge, (figure 2.12).

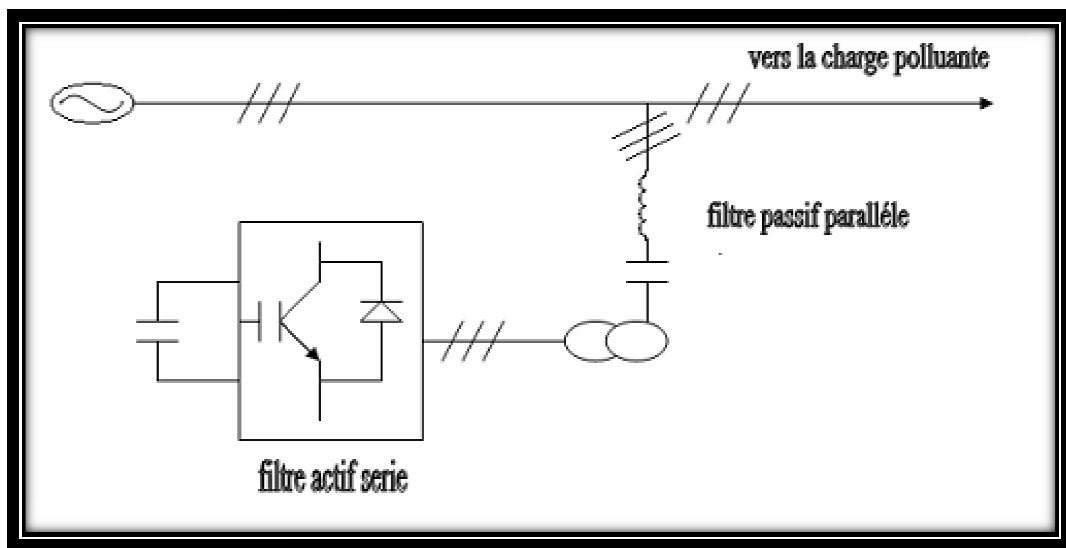


Figure 2.12: Filtre actif et filtres passifs en parallèles avec la charge.

2.2.4.3. Le filtre actif parallèle et le filtre passif parallèle :

Le rôle du filtre actif parallèle est la compensation des courants harmoniques basse fréquence émis par la charge polluante. Le filtre passif, accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques haute fréquence 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 cyclo-convertisseur de forte puissance, (figure 2.13).

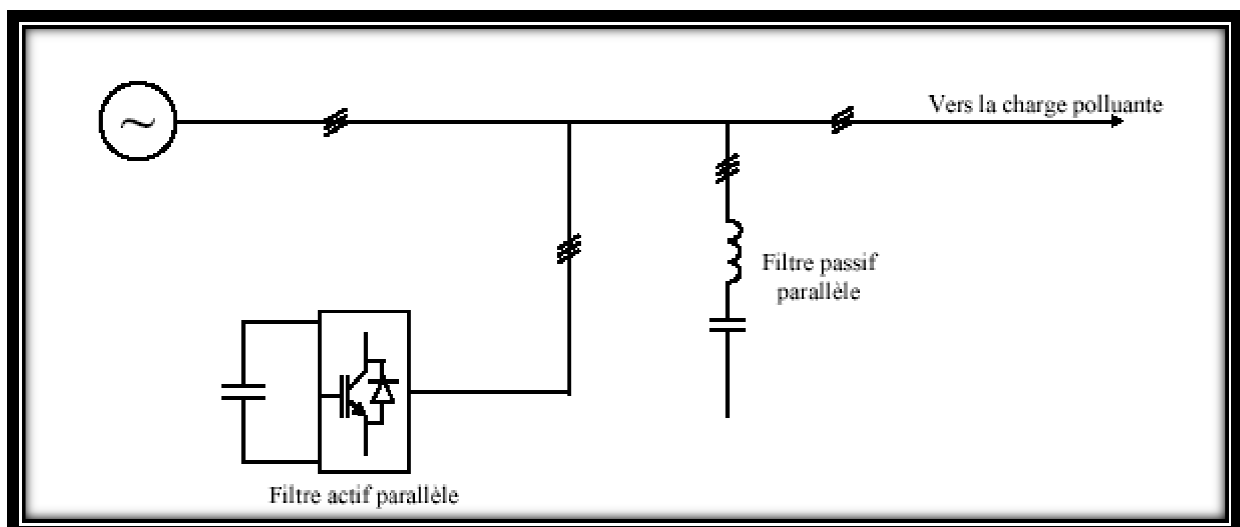


Figure 2.13: Filtre actif parallèle et filtre passif parallèle

Conclusion

La solution la plus couramment mise en œuvre jusqu'à ce jour est celle du filtrage passif. A cette solution lourde et non exempte de risques, il est aujourd'hui proposé une alternative forte séduisante : l'utilisation de compensateurs actifs. Ces dispositifs utilisent une structure de type convertisseur statique de puissance. Ainsi, grâce aux progrès des semi-conducteurs, les convertisseurs, qui sont habituellement des pollueurs harmoniques, sont capables d'être des dépollueurs efficaces et auto-adaptatifs.

Chapitre III

Introduction

Vu l'immensité de ce site et le besoin quotidien d'électricité de celui-ci, SONATRACH a mis à sa disposition un réseau électrique autonome qui se compose essentiellement d'une alimentation principale (turbogénérateur) et une autre alimentation de secours (groupe électrogène) pour assurer la continuité du service. Aussi, des systèmes de délestage sont installés. Cependant, si un de ces deux générateurs s'arrête et que la puissance demandée, à ce moment, est supérieure à la puissance développée par le générateur restant en service, alors le système de délestage entre en action pour déconnecter un certain nombre d'utilisations dans un ordre préétabli. D'un autre côté si la température ambiante est de 55°C, les deux générateurs ne pourront produire que 5.9MW chacun, ce qui, en fonctionnement en période de pointe pourrait être insuffisant, d'où la nécessité de délester, pour ne laisser que les utilisateurs dits critiques.

3.1. Alimentation principale [13]

L'énergie électrique requise par le complexe de REB est fournie par trois générateurs électriques identiques entraînés par des turbines à gaz. Ces trois générateurs ont une puissance de 10MW chacun.

Ces trois générateurs ont les caractéristiques nominales suivantes :

- Tension : 11 KV.
- Fréquence : 50 Hz.
- Puissance active : 10 MW.
- $\cos \varphi$: 0.8 ;

En fonctionnement normal, deux de ces trois générateurs sont nécessaires pour produire une énergie électrique suffisante à consommer par le champ. Chacun de ces générateurs débite sur un jeu de barres principal de tension 11KV qui alimente, via des transformateurs, d'une part, les réseaux 5.5KV tels que les moteurs 5.5KV et d'autre part, les tableaux basse tension (moteurs et équipements de puissance...) (figure 3.1).

Les sous stations ont été construites dans le cadre du projet de récupération assistée de pétrole brut.

3.2. Alimentation de secours [13]

Le centre de production est équipé par trois groupes diesel de 320KW chacun, deux au niveau des salles de contrôle CPF et TCF, pour assurer l'alimentation des chargeurs de batteries et UPS (Uninterruptible Power Supply), éclairage ...etc. Un troisième groupe est utilisé pour alimenter les auxiliaires de la turbine pendant le démarrage.

Ces deux groupes diesel sont équipés d'un système de démarrage automatique ATS (Automatique Transfert Switch).

3.3. Alimentation sans interruption [11]

Le système d'alimentation sans interruption (ASI) assure la protection de différents types de matériels électriques sensibles comme par exemple, ordinateurs, postes de travail, terminaux de ventes, instruments critiques, systèmes de télécommunication, systèmes de contrôle de processus, etc. L'ASI les protège contre tout problème en rapport avec la distribution d'énergie électrique de mauvaise qualité ou une perte d'alimentation complète.

Le matériel électrique sensible doit être protégé contre tout brouillage électrique.

Le brouillage provenant de l'extérieur du système (par exemple foudre, accidents de la société de distribution d'énergie électrique, transmissions radio) et de l'intérieur du système (par exemple moteurs, climatiseurs, distributeurs automatiques et machines à souder à l'arc) peut créer des perturbations sur les lignes électriques connectées au matériel sensible. Il peut s'agir des problèmes suivants: coupure d'alimentation, baisse ou hausse de tension, fluctuation de tension lente, variations de fréquence, bruit différentiel et en mode commun, transitoires, etc.

L'ASI fournit une alimentation électrique stable et maintient une tension constante et, le cas échéant, isole la sortie de la charge critique. Ces mesures empêchent la transmission des perturbations électriques au système critique, où elles risquent de provoquer des dégâts logiciels et matériels, ainsi qu'un fonctionnement irrégulier de l'équipement.

3.3.1. Les différents types des ASI

3.3.1.1. Alimentation sans interruption passive (Off - line)

La première configuration consiste à dériver du courant du réseau pour charger les batteries, le réseau fournissant l'énergie à la charge à travers un filtre, figure 3.2. Le convertisseur DC/AC (ou onduleur) ne démarre que lorsque le réseau disparaît. Le convertisseur AC/DC (redresseur) maintient la batterie chargée et peut compenser les harmoniques générés par la charge. En fonctionnement normal, la batterie est chargée, aucun convertisseur ne fonctionne, seules les pertes du filtre sont à déplorer. Cependant, le convertisseur met un certain temps (entre 2 et 10 ms) à remplacer le réseau. Seules les pertes de réseau plus importantes sont compensées. Le filtre peut atténuer les perturbations. Il est possible de n'utiliser qu'un seul convertisseur réversible. Cette première configuration présente un coût minimal, assorti d'une protection du même ordre.

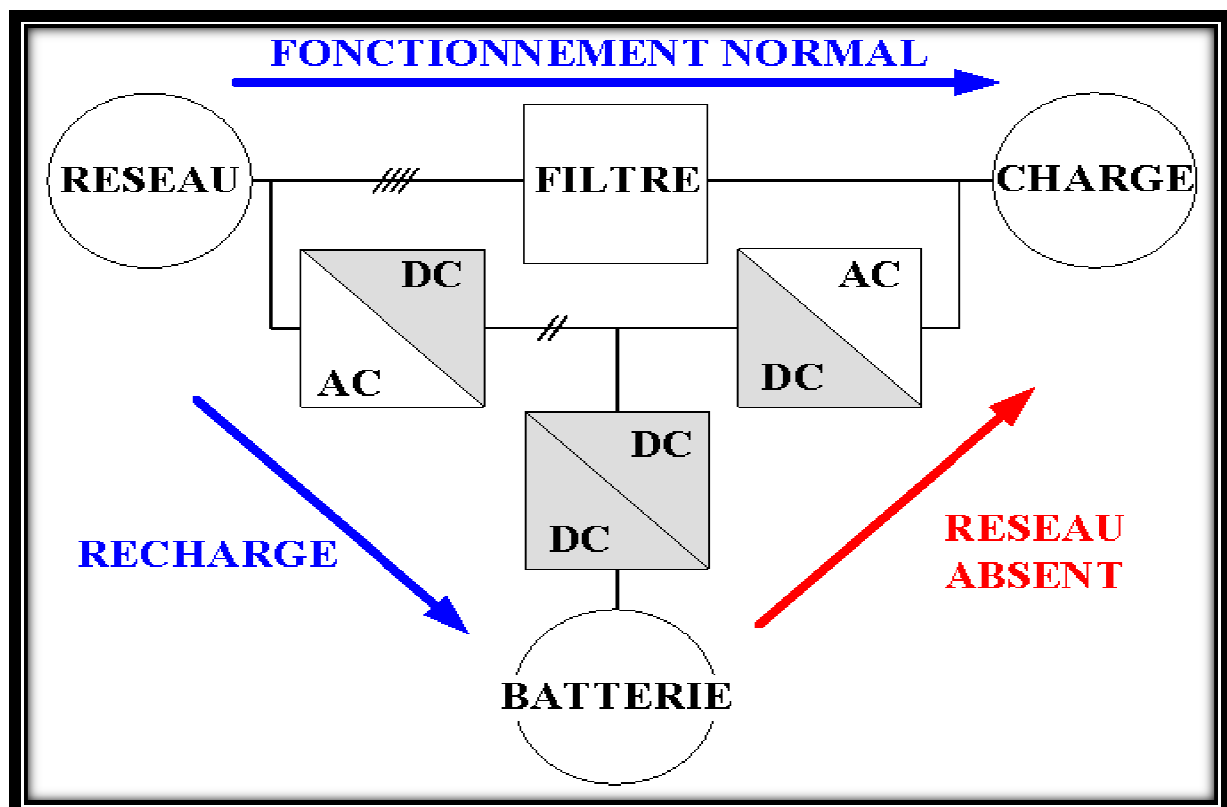


Figure 3.2 : Alimentation sans interruption passive (Off-line)

3.3.1.2. Alimentation sans interruption interactive (Line interactive)

Dans une deuxième configuration, un autotransformateur en série avec le flux de puissance permet de compenser les différences statiques entre la tension fournie par le réseau et la tension nominale de la charge, figure 3.3. Par conséquent, le fonctionnement est amélioré par rapport à la première version, mais pas la protection.

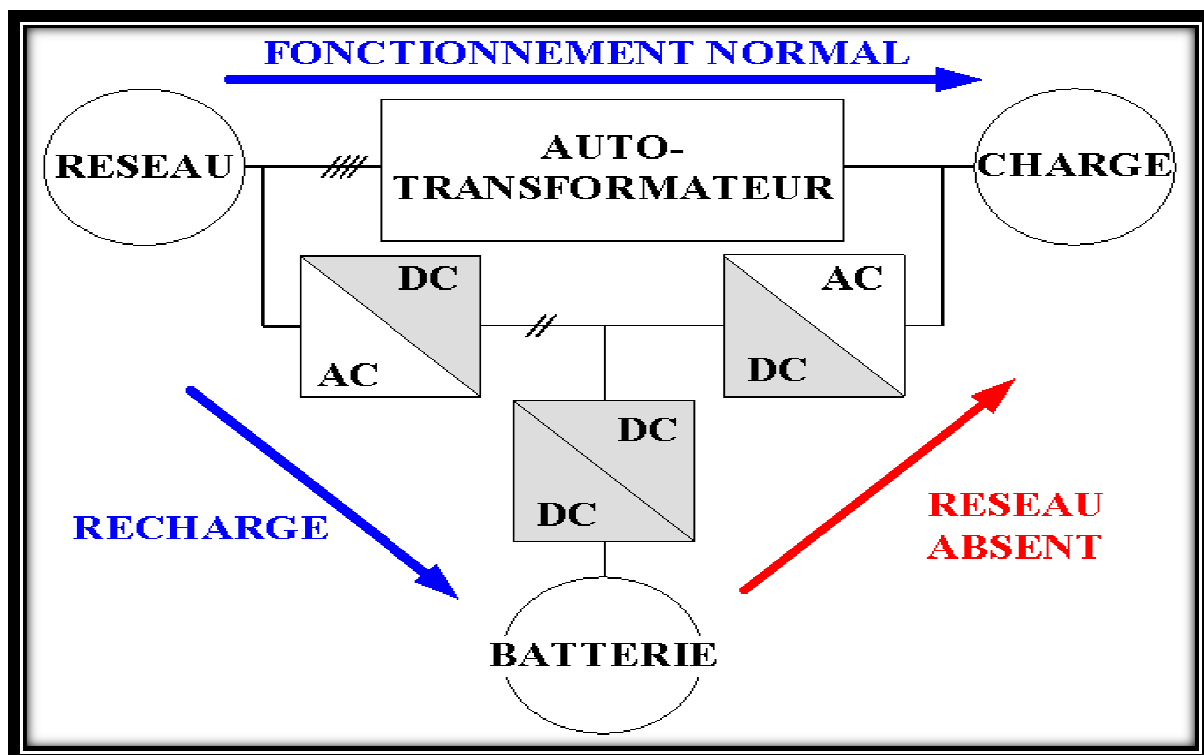


Figure 3.3: Alimentation sans interruption interactive (« Line interactive »)

3.3.1.3. Alimentation sans interruption triangle (Delta conversion)

Sur une idée similaire, la « Delta conversion » utilise un transformateur de courant pour contrôler le courant absorbé sur le réseau, figure 3.4. L'onduleur recharge les batteries et contrôle la tension de la charge, tandis que le transformateur et son convertisseur contrôlent la tension du bus continu par l'amplitude du courant absorbé. Lors de la perte du réseau, le maintien de la tension de sortie est assuré sans délai. L'absorption de la puissance sur le réseau se fait à facteur de puissance unitaire.

Néanmoins, ils ne gèrent qu'une fraction de la puissance, qui dépend du point de fonctionnement. Les pertes sont donc limitées. La charge subit la fréquence du réseau (pas de changement de fréquence possible).

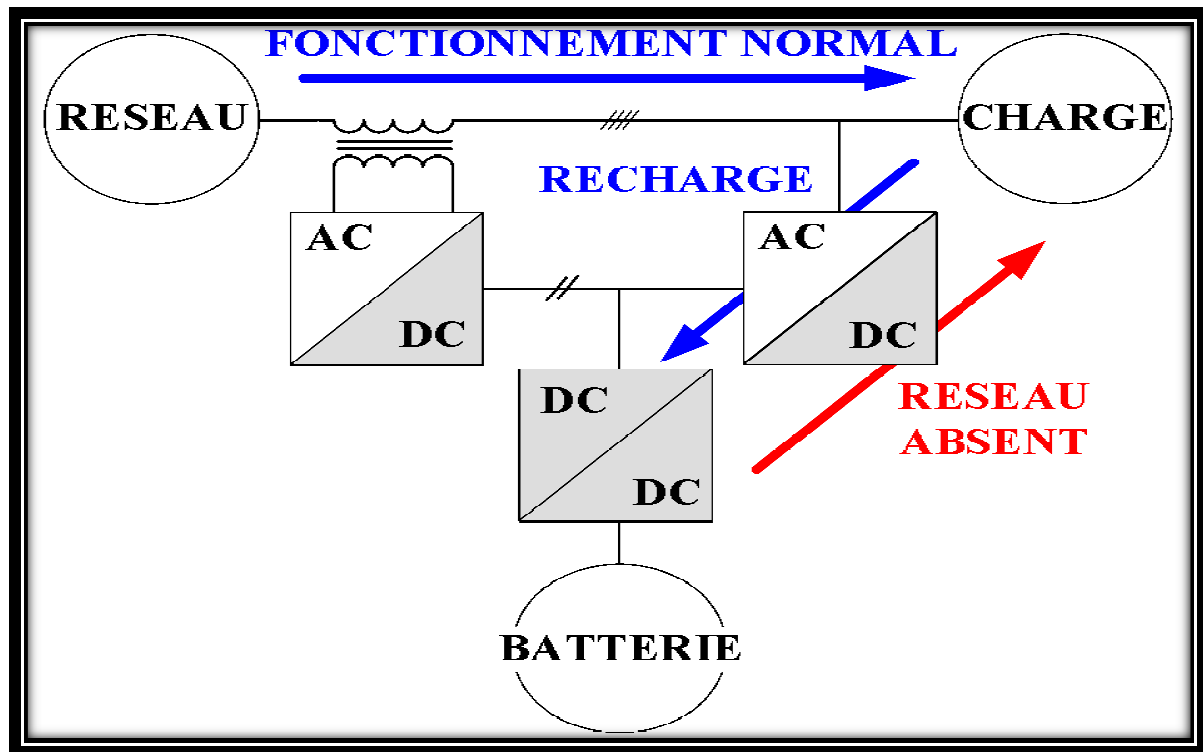


Figure 3.4 : Alimentation sans interruption triangle (Delta conversion)

3.3.1.4. Alimentation sans interruption à double conversion (On-line)

C'est la topologie de notre procédé. Elle effectue, en permanence, comme son nom l'indique, une conversion de l'alternatif vers le continu (AC/DC), suivie d'une conversion opposée (DC/AC). La charge est complètement découplée du réseau d'alimentation par un bus de tension continue. La tension et la fréquence de sortie peuvent être fixées à des valeurs indépendantes du réseau. Lors d'une coupure du réseau, l'onduleur puise dans les batteries l'énergie nécessaire à la charge de manière transparente pour celle-ci. Ce découplage complet permet une protection maximale de la charge, jusqu'au court-circuit d'entrée ou de sortie. En contrepartie, cette double conversion permanente engendre des pertes conséquentes, puisque l'intégralité de la puissance de la charge transite par les convertisseurs. Néanmoins, les ASI sont utilisées pour protéger les charges. De fait, son excellent niveau de protection l'a imposé pour les puissances supérieures à la dizaine de kilowatts.

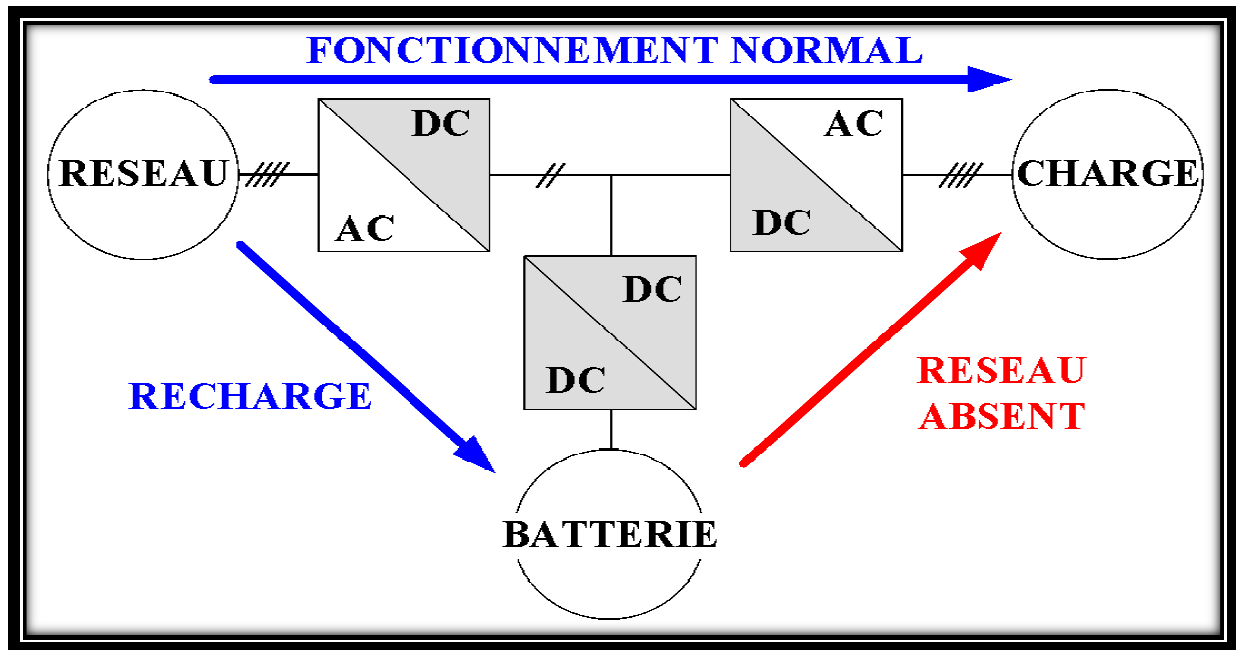


Figure 3.5 : Alimentation sans interruption à double conversion (« On-line »)

3.3.2. Principe de fonctionnement de notre procédé [13]

L'ASI à double conversion fonctionne fondamentalement comme un convertisseur c.a. - c.c. - c.a. Le premier stade de conversion (de courant alternatif en courant continu) utilise un redresseur à diodes pour convertir l'alimentation en une tension de jeu de barres continue.

Le courant continu du jeu de barres produit par le redresseur, engendre simultanément l'alimentation nécessaire pour charger la batterie (utilise un système de charge à tension compensée avec la température qui prolonge la durée de vie de la batterie) et l'alimentation à la section de l'onduleur qui utilise le dernier interrupteur IGBT à modulation de largeur d'impulsion (PWM) - et fournit la seconde phase de conversion, en l'occurrence la reconversion de la tension continue du jeu de barres en une forme d'onde à tension alternative.

Au cours du fonctionnement normal, les sections du redresseur et de l'onduleur sont toutes les deux actives et fournissent une alimentation régulée, tout en entretenant en même temps la charge de la batterie. Dans l'éventualité d'une panne de secteur, le redresseur est mis hors fonction et l'onduleur est alimenté uniquement à partir de la batterie. La charge critique est maintenue dans de telles conditions jusqu'à ce que la

batterie soit entièrement épuisée, l'ASI cessant alors de fonctionner. La batterie est complètement déchargée lorsque la tension de la batterie descend à un niveau inférieur à la valeur préalablement réglée (par exemple, 330V C.C. pour un système en courant alternatif de 400 V).

Le laps de temps au cours duquel la charge peut être maintenue à la suite d'une coupure de l'alimentation du secteur est qualifiée de '*Délai d'Autonomie*' du système et est fonction de la capacité en A/hr de la batterie, d'une part, et du pourcentage de charge appliquée, d'autre part.

Les ASI de type double conversion (on-line), majoritairement utilisées en moyenne et forte puissances, comportent généralement :

- un redresseur-chargeur en entrée qui prélève et redresse l'énergie du réseau pour charger ou maintenir une batterie et alimenter un onduleur.
- une batterie qui assure une autonomie de fonctionnement en cas de coupure du réseau.
- un onduleur qui fournit une énergie de qualité constante élevée (fréquence, tension... dans des tolérances strictes).
- un contacteur statique (by-pass statique) qui peut transférer sans coupure la charge sur le réseau si nécessaire, pour permettre une alimentation "dégradée" (sans onduleur) de la charge.
- un by-pass manuel qui permet des opérations de maintenance.

Ce type d'ASI peut fonctionner en :

- ✓ mode normal : onduleur alimenté par le réseau via un chargeur-redresseur.
- ✓ mode autonomie : onduleur alimenté par la batterie.
- ✓ mode by-pass, directement depuis le réseau via le by-pass.

Du fait de sa situation d'interface entre réseau et charges sensibles et de ses composants, l'ASI peut être considérée comme un récepteur non linéaire, donc générateur de courants harmoniques, pour le réseau amont, car connecté à ce réseau par un redresseur/chargeur d'entrée ou bien c'est une source d'alimentation pour les charges aval, en général, elles aussi non linéaires et génératrices d'harmoniques.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté brièvement les différentes alimentations du réseau électrique de Rhourde El Baguel (REB). Ainsi, on s'est familiarisée avec l'alimentation sans interruption dans le but de dimensionner l'installation pour déterminer l'impédance équivalente du réseau et définir les charges non linéaires qui génèrent des harmoniques.

Dans le chapitre suivant nous allons faire la simulation d'un filtre passif.

Chapitre IV

Introduction

De nos jours, la présence de l'électronique de puissance dans les réseaux industriels pose un sérieux problème de qualité d'énergie électrique. Le réseau électrique de REB est constitué de plusieurs charges non linéaires, par exemple l'unité d'optimisation qui se compose de micro ordinateurs, automates programmables (API) et éclairage (salle de contrôle). Vue son utilité, cette dernière est alimentée par une Alimentation Sans Interruption (ASI) dans laquelle on a effectué nos mesures.

Dans ce chapitre on décrit le filtre passif utilisé pour réduire les perturbations des courants harmoniques résultants des charges non linéaires dans la salle de contrôle.

4.1. Mesure des paramètres de la charge

Il existe plusieurs types d'appareils de mesure d'harmoniques. Dans notre cas on a utilisé la pince ampérométrique de qualité d'énergie Fluke 345 qui est un outil robuste, précis et professionnel destiné aux mesures industrielles du courant, de la tension et de la qualité de l'énergie.

Nous avons effectué nos mesures au niveau de l'alimentation sans interruption à l'entrée du redresseur comme le montre la figure 4.1.

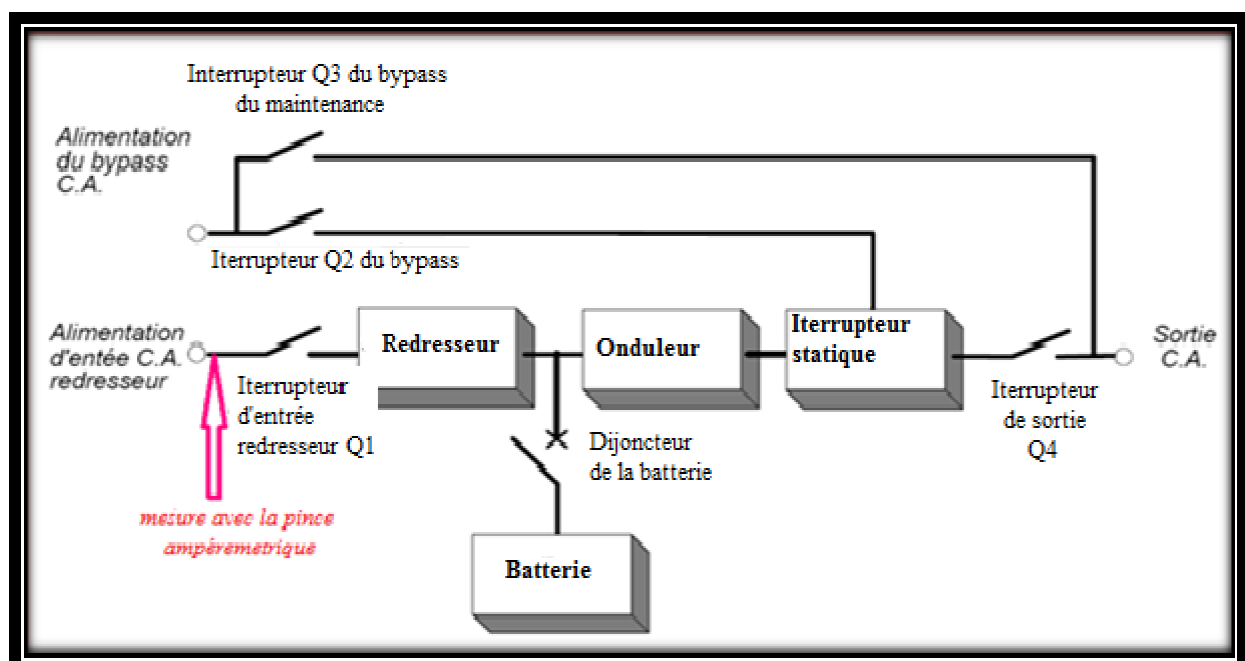


Figure 4.1 : Schéma d'une ASI.

4.1.1 Résultats des mesures

a)-Les valeurs de la tension

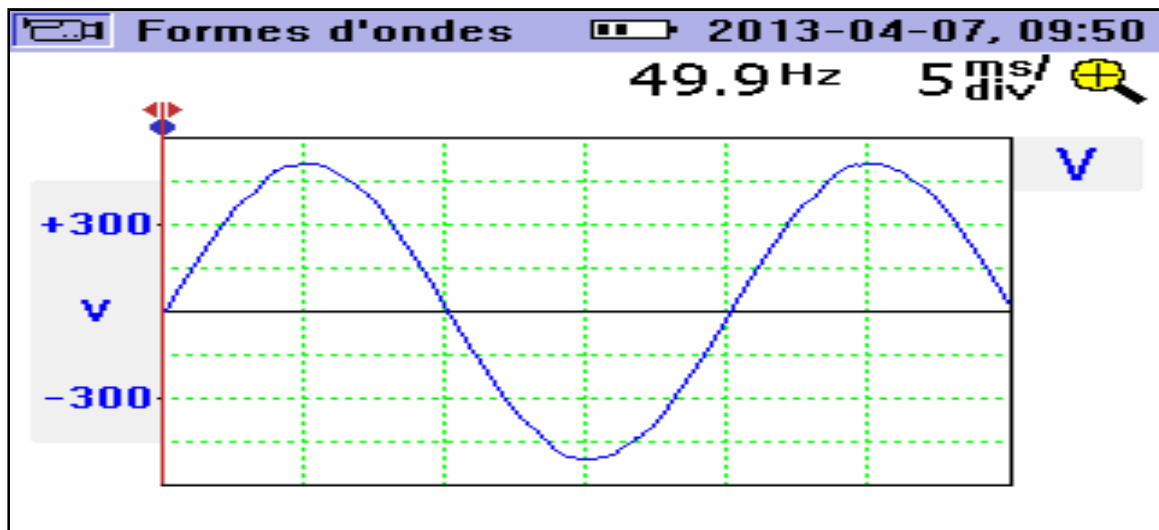


Figure 4.2 : La forme d'onde de tension

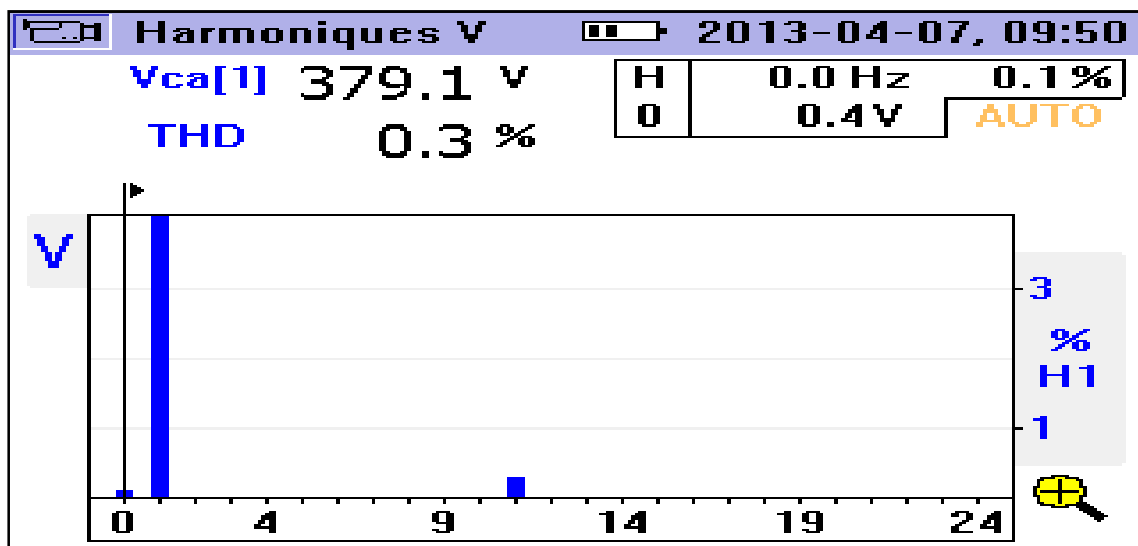


Figure 4.3 : Le spectre d'harmoniques de tension.

V_{ca} : Tension fondamentale.

V_{cc} : Tension de court-circuit.

V_{eff} : Tension efficace.

THD : Taux de distorsion harmoniques.

- **Interprétation**

On remarque que la forme d'onde de la tension est sinusoïdale. D'après son spectre on voit qu'il n'y a que le fondamental, ce qui justifie le taux de distorsion très faible ($THD_v=0,3\%$).

D'après la norme CEI (Comité Electrotechnique International) dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le TDH est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet néfaste sur l'installation. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains.

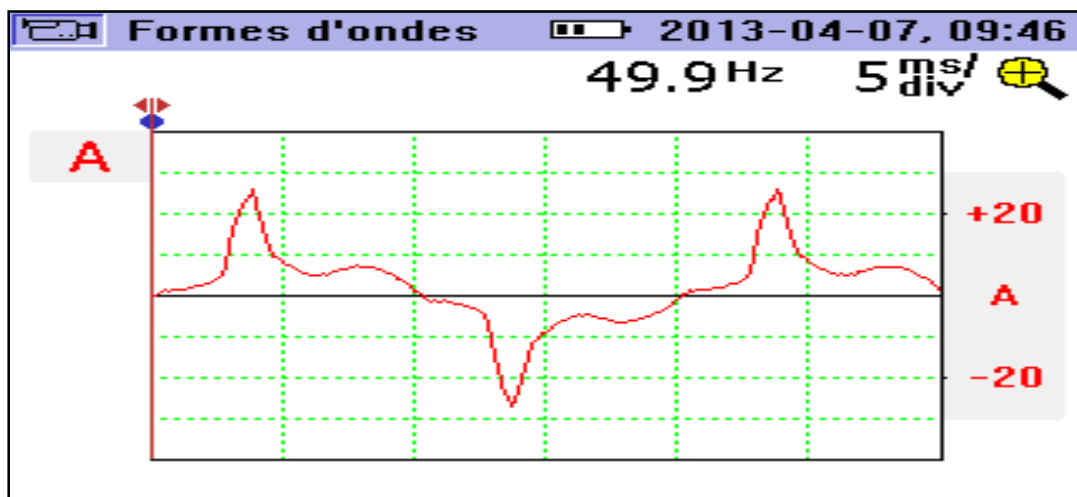
b)- Les valeurs de courant

Figure 4.4 : La forme d'onde du courant.

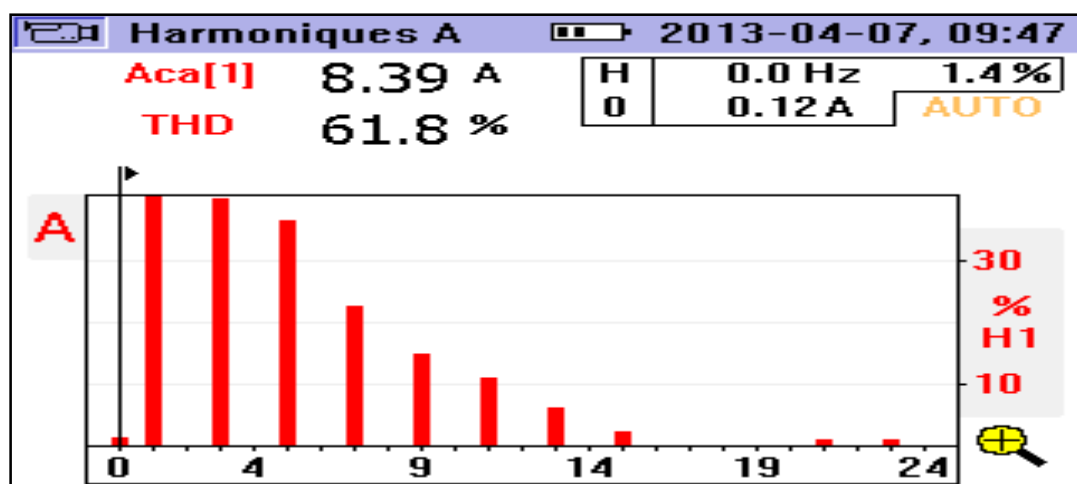


Figure 4.5 : Le spectre d'harmoniques de courant.

Tel que :

A_{ca} : Courant fondamental.

A_{cc} : Courant de court circuit.

A_{eff} : Courant efficace.

THD : taux de distorsion harmonique.

- **Interprétation**

On remarque que la forme d'onde du courant est nettement déformée .Elle n'est pas sinusoïdale. Vue son spectre et le (THD =96.1%) on peut conclure que cette installation est très polluée.

c)-Tableau des puissances de la charge

Alim 1 phase			2013-04-07, 09:53		
			49.9 Hz		
W	VA	VAR			
3177	3757	-2005			
V eff	A eff	PF			
379.1	9.91	0.845			

Figure 4.6 : Tableau des puissances de la charge.

Puissance apparente : $S=3757$ (VA)

Puissance active : $P=3177$ (W)

Puissance réactive : $Q=2005$ (VAR)

Facteur de puissance $F_p=0.845$

4.2. Calcul des paramètres de la charge

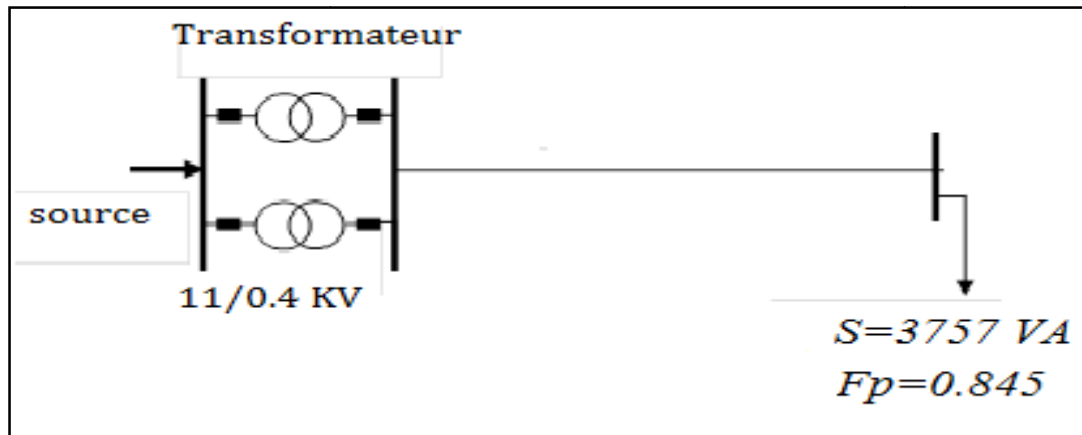


Figure 4.7 : Schéma unifilaire d'un réseau de distribution.

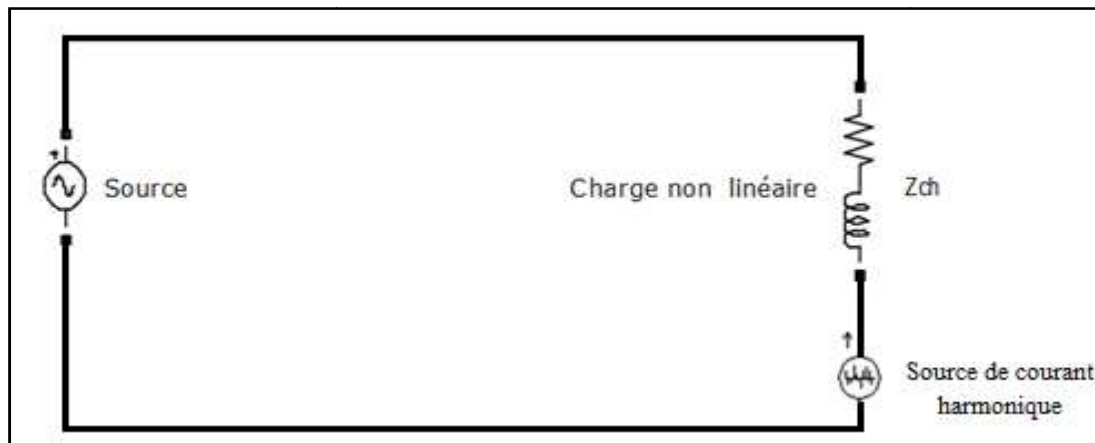


Figure 4.8: Schéma équivalent de la charge et la source.

D'après les résultats de mesure on calcule les paramètres de la charge.

On a:

$$S = P + jQ$$

$$P = 3177 \text{ W}$$

$$Q = 2005 \text{ VAR}$$

$$\text{D'où : } S_{ch} = 3177 + j 2005$$

$$\text{On a aussi : } Z_{ch} = \frac{|U|^2}{S_{ch}} = R_{ch} + jX_{ch}$$

Z_{CH} : C'est l'impédance de la charge.

- **Application numérique**

$$Z_{CH} = \frac{|U^2|}{S_{ch}} = \frac{220^2}{3177 + j 2005} = \frac{220^2}{3177 + j 2005} * \frac{3177 - j 2005}{3177 - j 2005}$$

$$Z_{ch} = \frac{220^2 * 3177}{3177^2 + 2005^2} - \frac{220^2 * j 2005}{3177^2 + 2005^2}$$

$$Z_{ch} = 10.89 - j6.87$$

Donc on déduit que :

$$R_{ch} = 10.89 \Omega$$

$$X_{ch} = 6.87 \Omega$$

4.2.1. Calcul des harmoniques du courant

a)-Le taux individuel des harmoniques

D'après le spectre d'harmoniques du courant on déduit les valeurs des taux individuels représentées dans le tableau suivant :

I ₃ %	I ₅ %	I ₇ %	I ₉ %	I ₁₁ %	I ₁₃ %	I ₁₅ %
39	36	23	16	11.5	7.5	3

Tableau 4.1: Le taux individuel des d'harmoniques.

b)-Calcul des valeurs efficaces des composantes harmoniques des courants

Pour calculer la valeur efficace du courant de chaque rang on utilise la formule suivante :

$$I_h(A) = I_h(\%) \cdot I_1 \quad (4.1)$$

I_h(%) : Taux individuel d'harmoniques de chaque rang h.

I₁ : Valeur efficace du courant fondamental.

$I_1(A)$	$I_3(A)$	$I_5(A)$	$I_7(A)$	$I_9(A)$	$I_{11}(A)$	$I_{13}(A)$	$I_{15}(A)$
9.87	3.84	3.55	2.27	1.57	1.13	0.74	0.1

Tableau 4.2: Valeurs efficaces des composantes harmoniques des courants

Le taux de distorsion de courant global est calculé avec la formule suivante :

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h(A)^2}}{I_1} \quad (4.2)$$

I_1 : Valeur efficace du courant fondamental.

$I_h(A)$: Valeur efficace du courant harmonique de rang h ;

Le résultat obtenu est :

$$THD = 61.46 \%$$

4.2.2. Calcul du facteur de déphasage

Le facteur de déphasage est donné par le rapport suivant :

$$\cos \varphi_1 = \frac{S.F_p}{V_1.I_1} \quad (4.3)$$

Tels que :

$\cos \varphi_1$: Facteur de déphasage.

S: La puissance apparente.

V_1 : La tension simple.

F_p : Facteur de puissance.

I_1 : Valeur du fondamental.

- Application numérique

$$\cos \varphi_1 = \frac{3757 \cdot 0.845}{379 \cdot 8.39} = 0.99 \approx 1$$

La Figure suivante représente le déphasage entre la tension et le courant de notre charge :

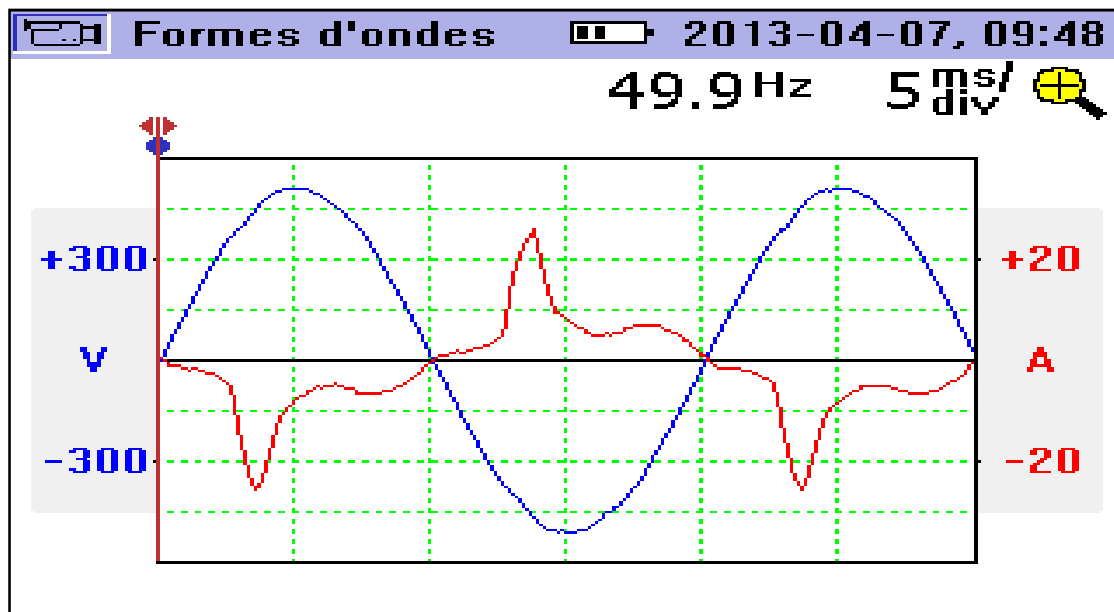


Figure 4.9: Déphasage entre la tension et le courant.

4.2.3. Calcul du facteur de déformation

C'est le rapport entre le facteur de puissance et le facteur de déphasage :

$$F_d = \frac{F_p}{\cos \varphi_1} \quad (4.4)$$

- Application numérique

$$F_d = 0.84 / 0.99 = 0.084$$

4.2.4. Calcul de la puissance déformante

La puissance déformante est donnée par la formule suivante :

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (4.5)$$

- **Application numérique**

$$D = 41.17 \text{ VA}$$

4.3. Conception des filtres passifs

On place un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, en parallèle avec le générateur d'harmoniques comme le montre la figure 4.10. Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'impédance du réseau.

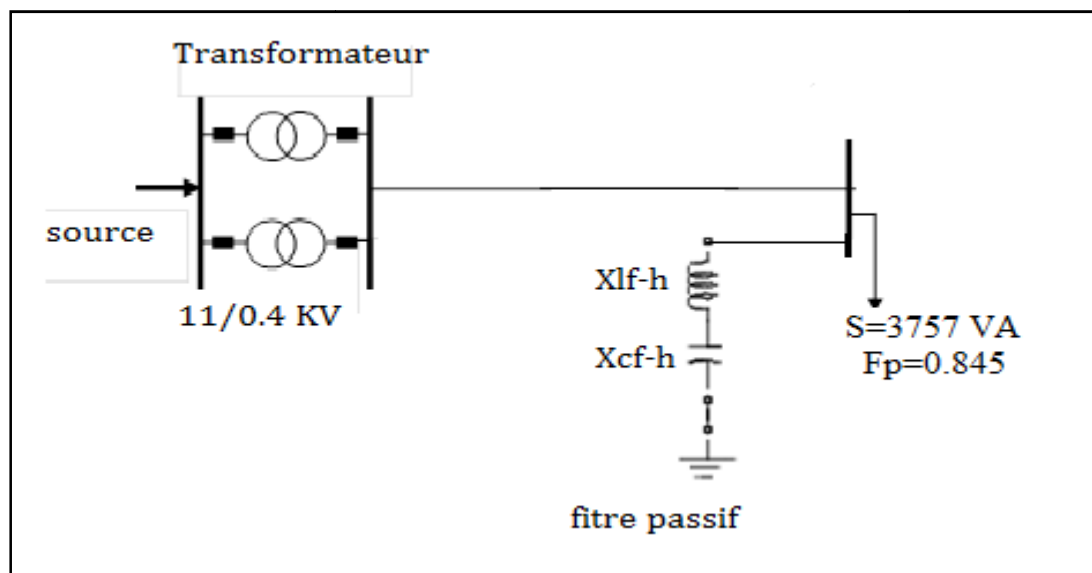


Figure 4.10 : Filtre passif accordé dans le réseau.

4.3.1 Calcul des filtres passifs [14]

Un circuit accordé (RLC) a une impédance :

$$Z = R + j \left(L * \omega - \frac{1}{C * \omega} \right) \quad (4.6)$$

Un circuit accordé (LC) a une impédance :

$$Z = j \left(L * \omega - \frac{1}{C * \omega} \right) \quad (4.7)$$

En cas de résonance, la réactance inductive devient égale à la réactance capacitive et on peut écrire

$$L * \omega_r = \frac{1}{C * \omega_r} \quad (4.8)$$

Avec :

$$\omega_r = 2\pi F_r \quad (4.9)$$

Tels que :

ω_r : Pulsation de résonance

F_r : Fréquence de résonance, égale à :

$$X_r = L * \omega_r = \frac{1}{C * \omega_r} \quad (4.10)$$

$$\omega_r^2 * L * C = 1 \quad (4.11)$$

En régime harmonique :

$$\begin{cases} X_{L-h} = h X_L \\ X_{C-h} = \frac{X_C}{h} \end{cases} \quad (4.12)$$

En cas de résonance :

$$h * X_L = X_C / h$$

Soit :

$$h^2 = X_C / X_L$$

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (4.13)$$

4.3.2. Filtrage d'un harmonique spécifique (monobranche)

On utilise un seul filtre accordé sur un rang harmonique spécifié (Ex : $h = 5, 7, \dots$) on réalise les deux conditions suivantes pour que le filtre soit accordé et sert à éliminer la tension harmonique correspondante à celui-ci : Figure 4.11

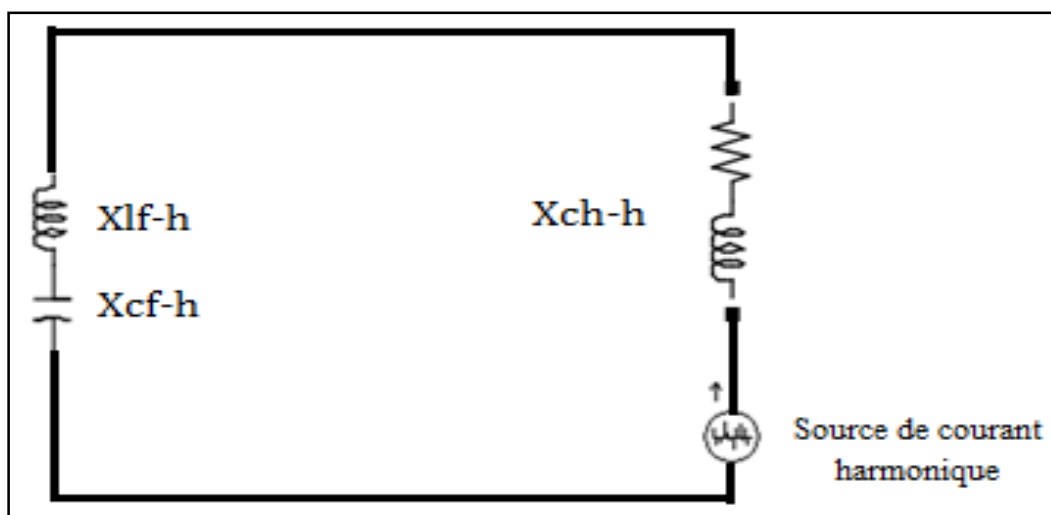


Figure 4.11 : Schéma équivalent d'un filtre passif monobranche.

$$\begin{cases} \omega h = \frac{1}{\sqrt{LC}} * \frac{1}{\sqrt{X_{Lf}/X_{Cf}}} \\ X_{Lf} - X_{Cf} = X_{Ch} \end{cases} \quad (4.14)$$

Avec :

L : Inductance du filtre.

C : Capacité du filtre.

h : Rang harmonique.

X_{Lf} : Réactance inductive du filtre d'accord.

X_{Cf} : Réactance capacitive du filtre d'accord.

X_{Ch} : Réactance inductive de la charge.

Après simplification on tire les valeurs des réactances inductives et capacitives respectivement comme suit :

$$\begin{cases} X_{Lf-h} = \frac{X_{Ch}}{(1-h^2)} \\ X_{Cf-h} = \frac{h^2 * X_{Ch}}{(1-h^2)} \end{cases} \quad (4.15)$$

- **Exemple de calcul**

$$h=5, \quad X_{Ch}= 6.87\Omega ,$$

$$X_{Lf_5} = 0.289 \Omega$$

$$X_{Cf_5}= 7.15 \Omega$$

Le tableau suivant résume les calculs pour les autres rangs harmoniques :

Rang	X_{Lf_h} (Ω)	X_{Cf_h} (Ω)
5	0.28	7.15
7	0.14	7.01
11	0.057	6.92

Tableau 4.3 : Valeurs des réactances capacitatives et inductives de chaque rang.

4.4. Simulation avec MATLAB

MATLAB C'est un outil de calcul des matrices

4.4.1. Simulation sans filtre

Le système a été simulé sous Matlab-Simulink. Les résultats obtenus sont représentés par les figures suivantes :

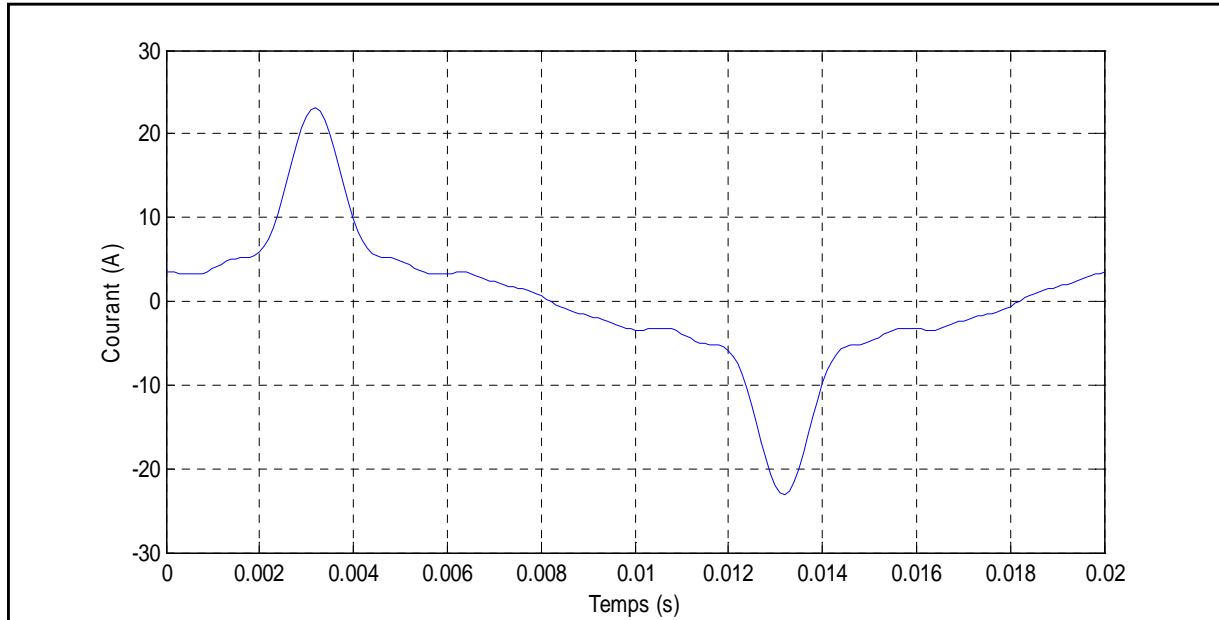


Figure 4.12: La forme du courant de charge avant filtrage avec un temps de simulation de 0.02s.

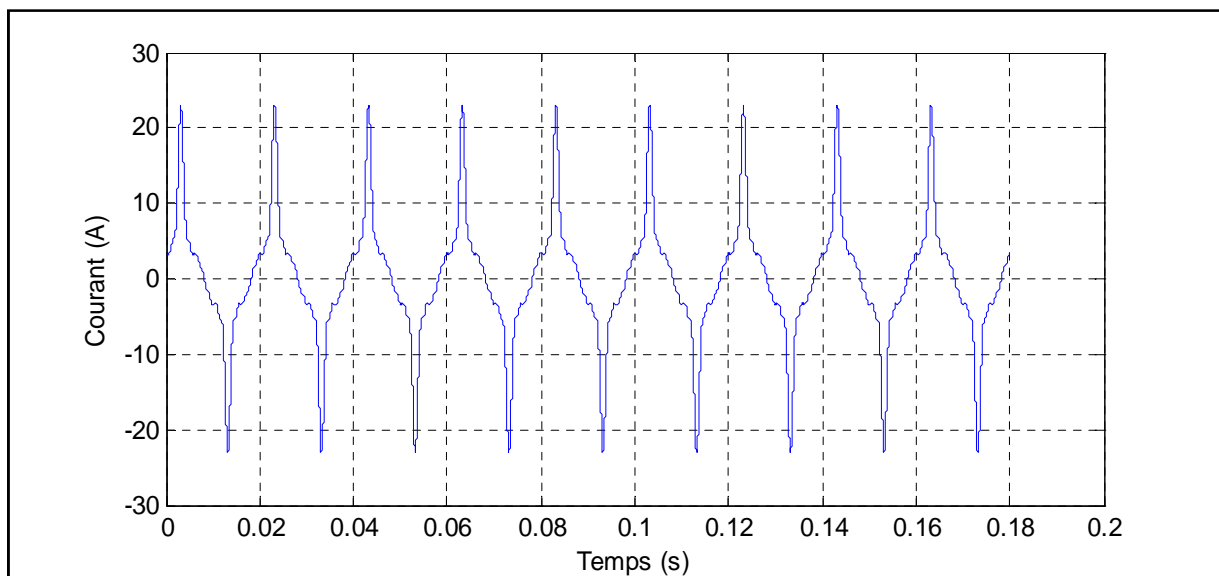


Figure 4.13: La forme du courant de charge avant filtrage avec un temps de simulation de 0.18s.

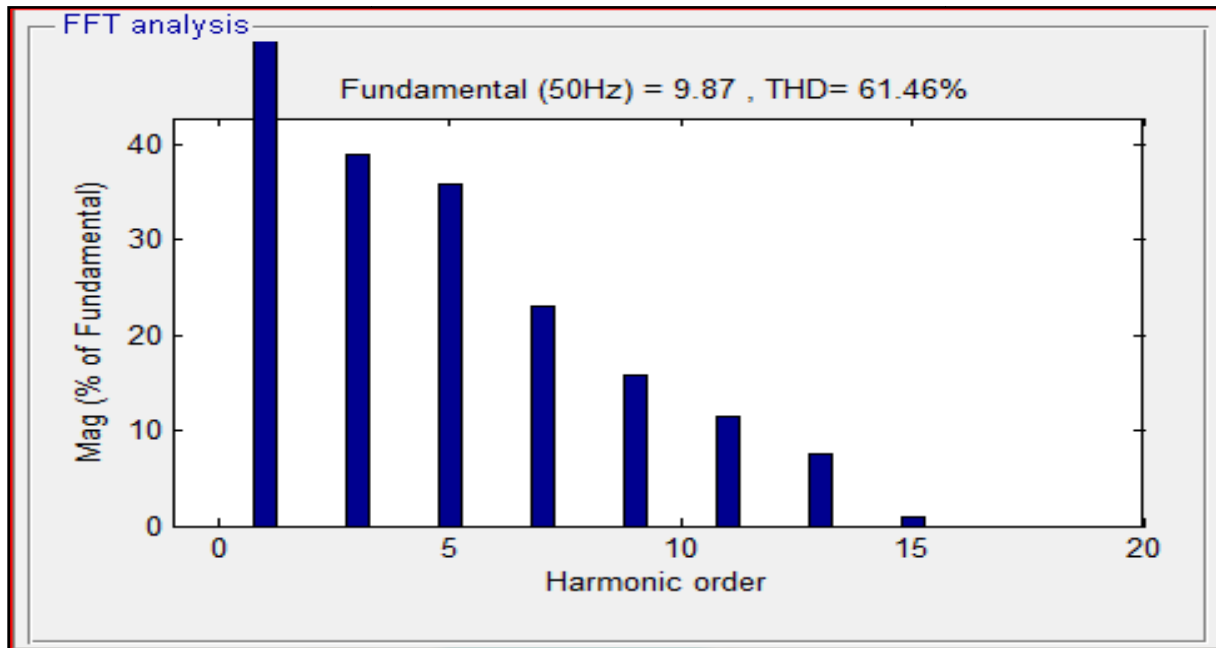


Figure 4.14 : Les spectres fréquentiels du courant de charge avant filtrage.

4.4.2. Simulation avec implantation d'un filtre accordé sur le rang 5

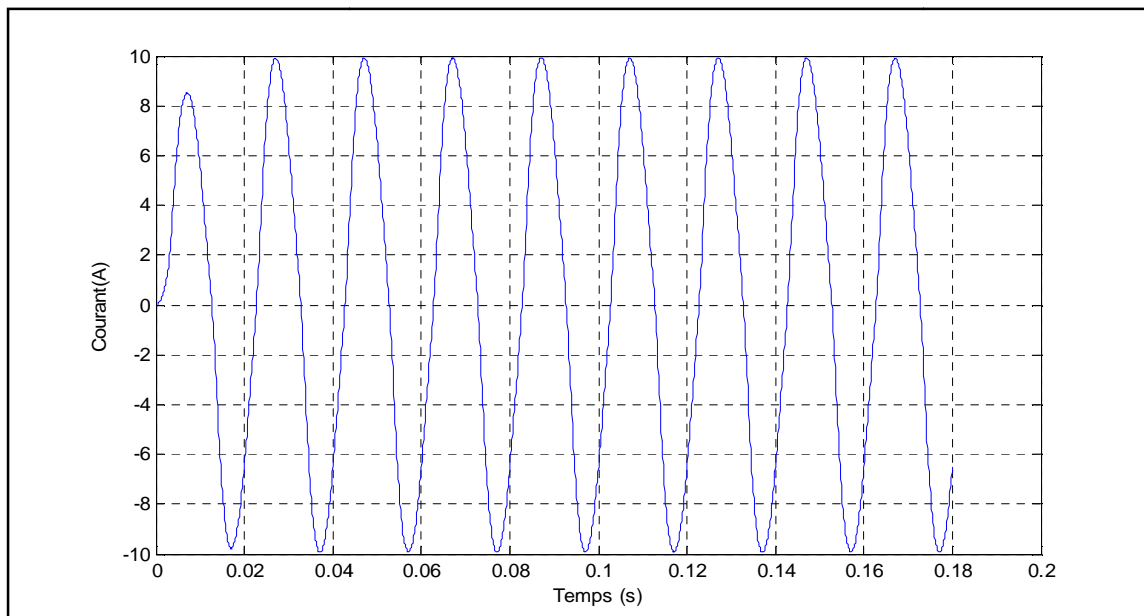


Figure 4.15: La forme du courant de charge après filtrage.

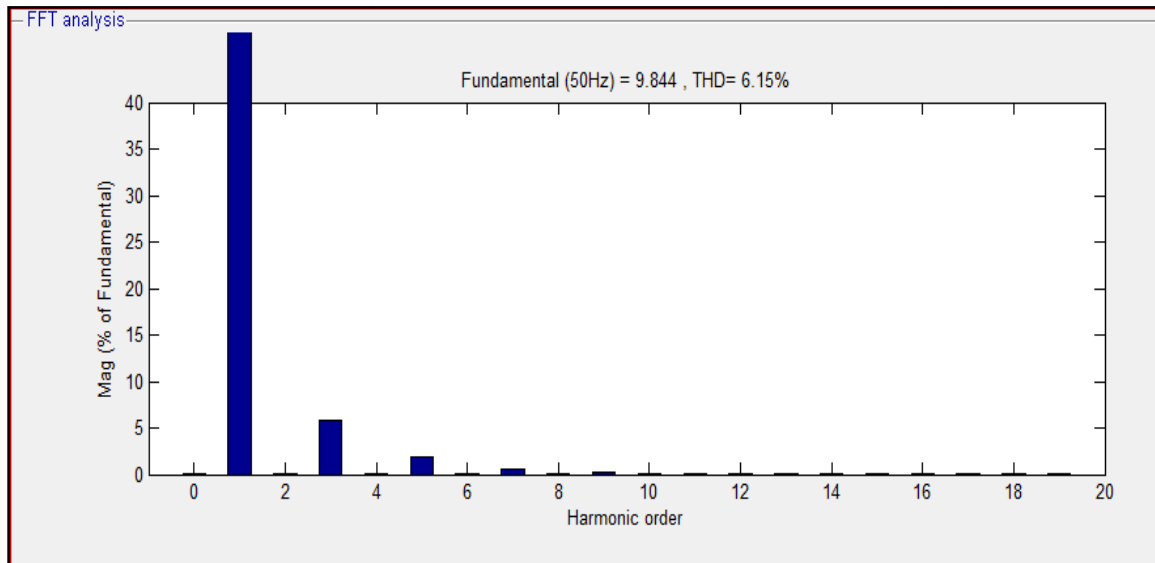


Figure 4.16 : Les spectres fréquentiels du courant de charge après filtrage.

Interprétation

D'après la figure 4.13 on remarque que la forme du courant est alternative mais non sinusoïdale à cause des harmoniques. Le taux de distorsion harmonique du courant est de 61.46% (figure 4.14).

Après l'implantation du filtre passif accordé sur le rang 5 on voit dans la figure 4.15 une nette amélioration de la forme d'onde du courant avec un taux de distorsion harmonique de 6.15% comme le montre la figure 4.16, ce qui est compatible avec la norme C.E.I.

On remarque aussi qu'avec l'implantation du filtre passif a une influence sur les autres rangs.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons utilisé le filtrage passif, celui-ci pour éliminer un rang harmonique spécifique. Pour cela on a utilisé un filtre monobranche constitué d'une inductance en série avec un condensateur de compensation accordé sur le rang 5, ce qui est le même pour le filtrage des autres rangs. Ce dispositif présente beaucoup d'inconvénients. Dans le chapitre suivant nous allons traiter le filtrage actif qui s'avère très intéressant comme solution de dépollution.

Chapitre V

Introduction

Vus les nombreux inconvénients que présentent les différentes méthodes de dépollution discutées dans les chapitres précédents, on a rendu l'utilisation des filtres actifs intéressante. Son principe de fonctionnement est d'injecter un courant harmonique en opposition de phase, de même forme et même amplitude que celui généré par la charge polluante.

L'étude par simulation d'un système quelconque passe par sa modélisation. Ainsi dans ce chapitre nous aborderons la modélisation des différentes parties du système global, réseau électrique équilibré, filtre actif parallèle et charge polluante.

5.1. Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluante

[15]

Le filtre actif parallèle n'est rien d'autre qu'un onduleur de tension commandé en courant qui possède une source dite flottante (capacité) et qui est connecté au réseau perturbé par un filtre inductif comme représenté par la figure 5.1.

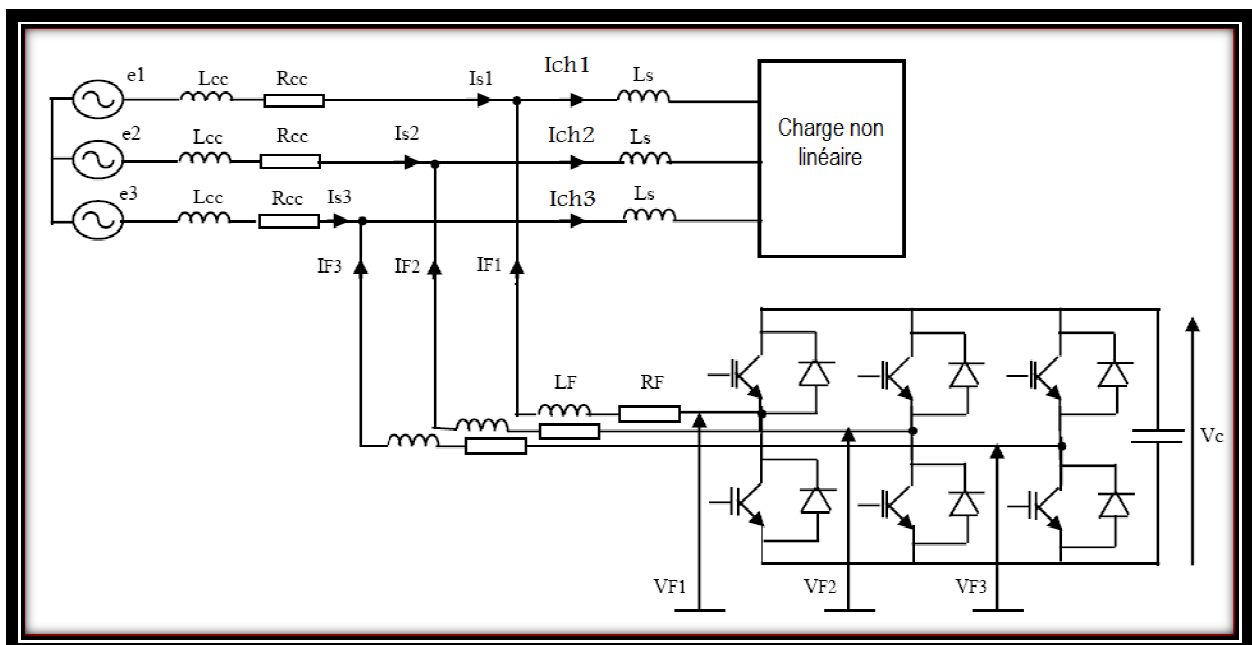


Figure 5.1 : Schéma synoptique de l'association filtre actif – réseau - charge polluante.

5.2 Modélisation de l'association réseau-filtre actif-charge polluante

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement.

5.2.1 Modélisation du réseau

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit, d'où la représentation du réseau par un système de f.e.m. triphasées équilibrées en série avec une impédance(figure 5.2).

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} = \sqrt{2} * 220 \begin{bmatrix} \sin(\theta) \\ \sin(\theta - 2 * \pi/3) \\ \sin(\theta - 4 * \pi/3) \end{bmatrix} \quad \theta = \omega * t \quad (5.1)$$

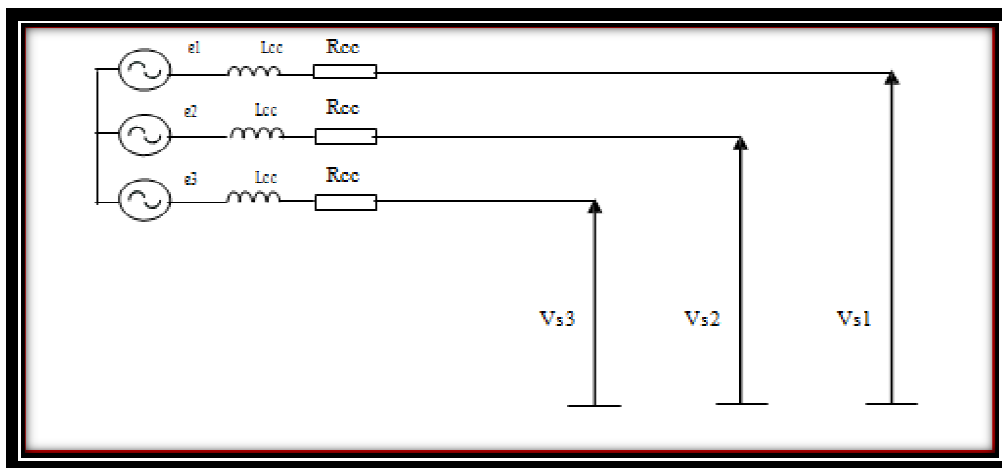


Figure 5.2 : Schéma synoptique d'un réseau triphasé équilibré.

5.2.2 Modélisation de la charge polluante [16]

La charge polluante qu'on vient d'étudier consomme un courant harmonique qui s'écrit sous la forme suivante :

$$i_{ch} = \begin{bmatrix} i_{ach} \\ i_{bch} \\ i_{cch} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I * \cos(\omega t - \varphi) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h * \cos(h\omega t - \varphi_h) \\ I * \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h * \cos\left(h\omega t - \varphi_h - h * \frac{2\pi}{3}\right) \\ I * \cos\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) + \sum_{h=2}^{\infty} I_h * \cos\left(h\omega t - \varphi_h - h * \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

I : Valeur efficace du courant fondamental.

I_h : Valeur efficace du courant harmonique de rang h .

Les courants I_{ch2} et I_{ch3} sont décalés respectivement de 120° et de 240° par rapport à I_{ch1} .

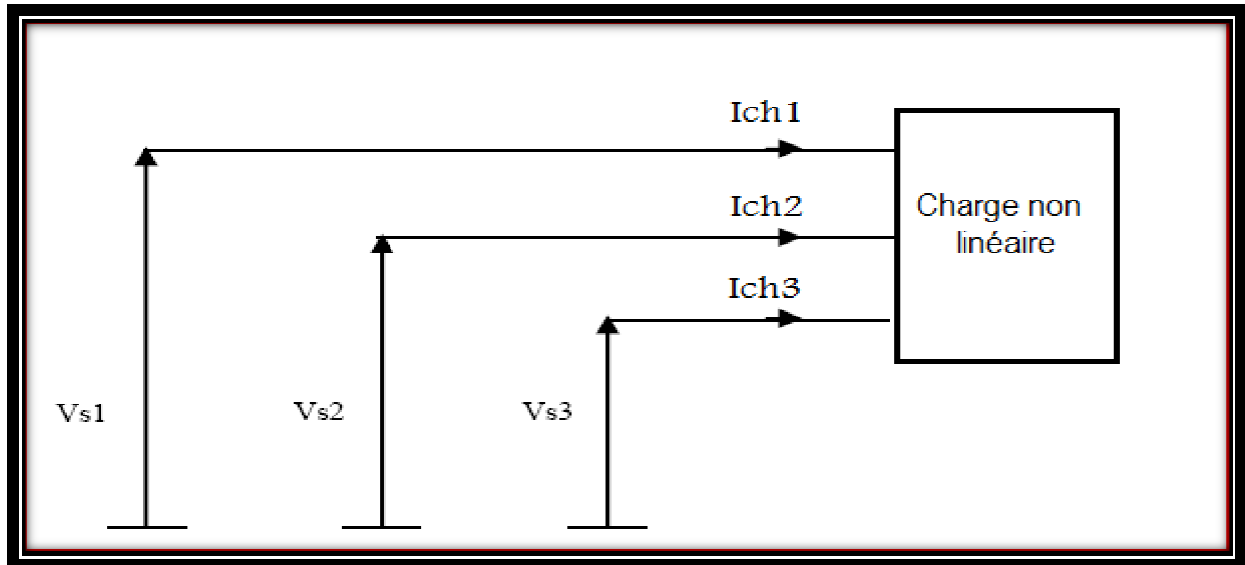


Figure 5.3 : Schéma synoptique d'une charge polluante.

5.2.3. Structure générale d'un filtre actif parallèle

La structure générale du filtre actif parallèle, se présente sous la forme de deux blocs : une partie puissance et la partie contrôle-commande. (figure 5.4)

La partie puissance est constituée :

- D'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- D'un filtre de sortie.

La partie contrôle-commande, quant à elle, est constituée :

- D'une méthode d'identification des courants perturbés.
- D'un régulateur de tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.

- D'un régulateur du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- D'une commande de l'onduleur de tension.

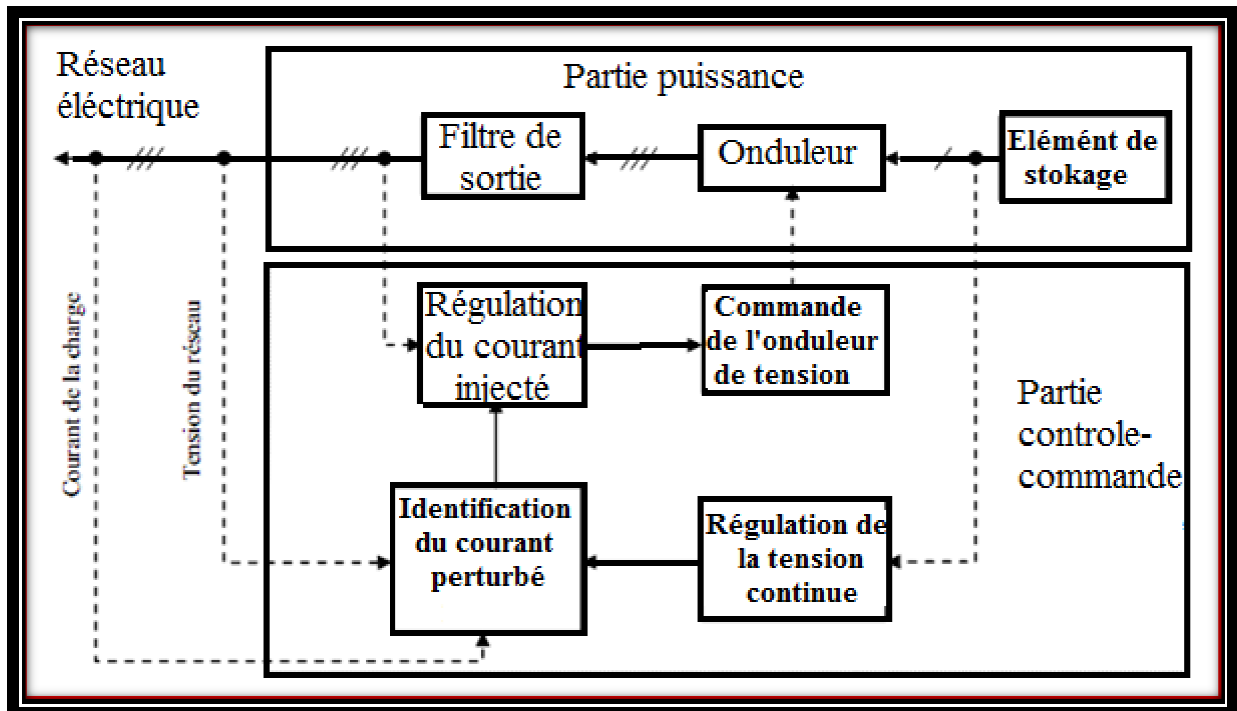


Figure 5.4 : Structure générale d'un filtre actif parallèle.

5.2.3.1. Etude de la partie puissance

a-Onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue – alternative. Il est constitué de six interrupteurs bidirectionnels en courant et unidirectionnels en tension qui commutent de manière à imposer des tensions simples alternatives en sortie de l'onduleur, figure 5.5.

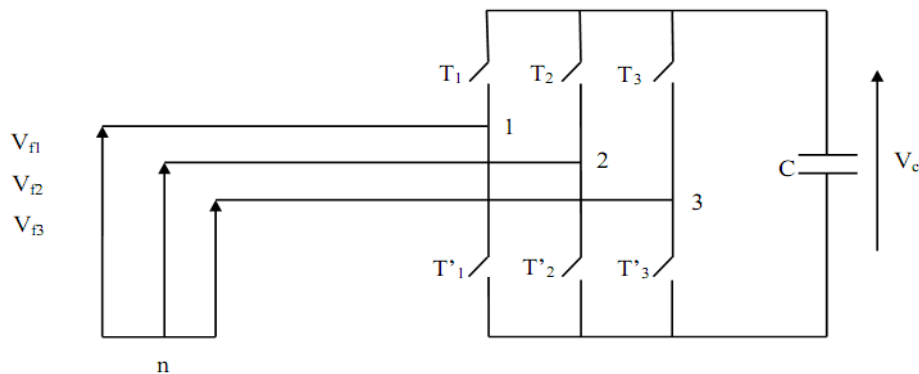


Figure 5.5 : Structure générale d'un onduleur.

Les interrupteurs supposés idéaux, sont toujours constitués d'un semi-conducteur commandable à l'ouverture et à la fermeture (GTO, IGBT) connecté en anti-parallèle avec une diode.

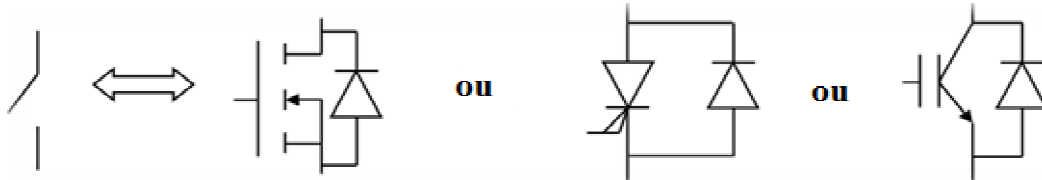


Figure. 5.6 : Interrupteurs de puissance.

b. Tension et courant à la sortie d'un onduleur

En considérant les différents états des interrupteurs, on peut déduire l'ensemble des tensions délivrées par l'onduleur pour la configuration triphasée étudiée.

Appelons T_k et T'_k les interrupteurs idéaux, connectés sur la phase k ($k=1, 2, 3$). C_k et C'_k sont les commandes logiques qui leur sont associées.

La commande est supposée alternée $k = \overline{C'_k}$.

On a :

$C_k = 1 \Rightarrow T_k$ passant et T'_k ouvert

$C'_k = 0 \Rightarrow T_k$ ouvert et T'_k passant

On définit les vecteurs des tensions triphasées $[V_f]_n$ et $[V_f]_M$ ainsi que le vecteur des variables logiques $[C]$:

$$[V_f]_n = \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix}, [V_f]_M = \begin{bmatrix} V_{f1M} \\ V_{f2M} \\ V_{f3M} \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (5-3)$$

$$[V_f]_n = [C] * V_c \quad (5.4)$$

Les tensions V_{f1M} , V_{f2M} , V_{f3M} , mesurées aux points 1,2 et 3, ne peuvent prendre que les valeurs V_c , $-V_c$ ou 0. En tenant compte de l'absence de tension homopolaire, les tensions simples délivrées par l'onduleur sont données par :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} V_{f1} \\ V_{f2} \\ V_{f3} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & -2/3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{f1M} \\ V_{f2M} \\ V_{f3M} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & -2/3 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} * V_c \quad (5-5)
 \end{aligned}$$

C- Elément de stockage d'énergie

Le stockage d'énergie du coté continue se fait souvent par un système capacitif représenté par un condensateur C qui joue le rôle d'une source de tension continue flottante V_e .

5.2.3.2. Etude de la partie commande [12][15]

a- Identification des courants de référence

Dans la littérature, différentes méthodes d'identification des courants perturbés ont été développées dans le but d'améliorer les performances des systèmes classiques de dépollution des installations électriques.

Nous avons choisi de mettre en œuvre une variante de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

a.1-Principe de fonctionnement de la méthode des puissances instantanées

Dans la méthode classique des puissances instantanées, on utilise généralement, soit un filtre passe-haut (FPH), soit un filtre passe-bas (FPB), afin de ne garder que la composante harmonique du signal. La figure 5.6 ci dessous représente le principe de fonctionnement de cette méthode.

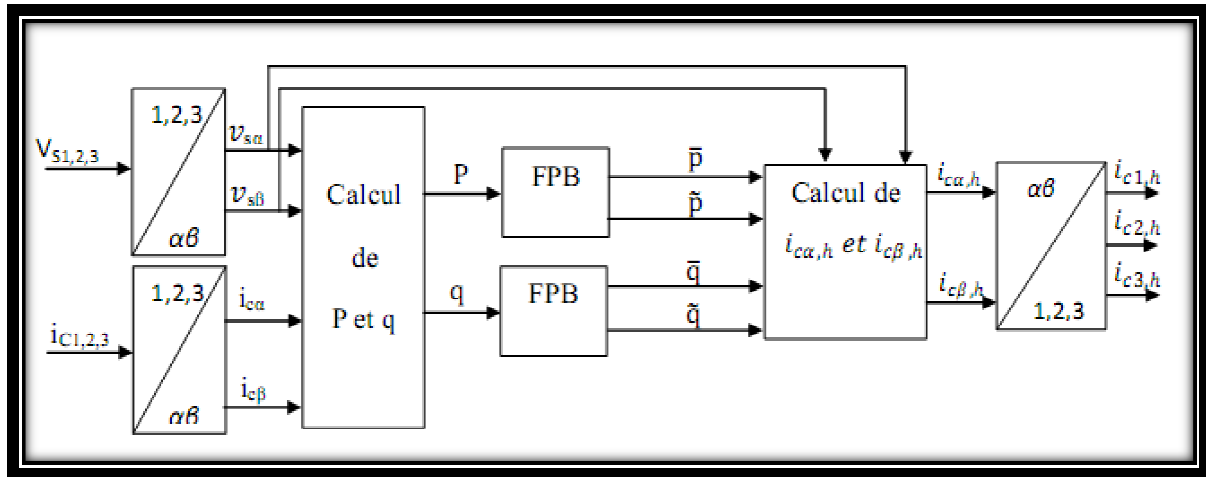


Figure 5.6 : Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées.

La méthode d'identification des courants harmoniques, est plus simple. Elle consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées, ce qui est relativement facile à réaliser.

On note respectivement les vecteurs des tensions simples au point de raccordement $[V_s]$ et des courants de charge $[I_{ch}]$ d'un système triphasé et équilibré par :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad [I_{ch}] = \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix}$$

Soient respectivement (V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}) et $(I_{ch1}, I_{ch2}, I_{ch3})$ les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé équilibré. On suppose que les tensions sont sinusoïdales. La transformation de ces grandeurs triphasées en composantes $\alpha\beta$ par l'application de la transformation de Concordia donne les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

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

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leur homologue triphasé on obtient :

$$p = V_{s\alpha} * I_{ch\alpha} + V_{s\beta} * I_{ch\beta}$$

$$p = V_{s1} * I_{ch1} + V_{s2} * I_{ch2} + V_{s3} * I_{ch3} \quad (5.4)$$

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

$$q = V_{s\alpha} * I_{ch\beta} - V_{s\beta} * I_{ch\alpha}$$

$$q = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2}) * i_{ch3} + (V_{s2} - V_{s3}) * I_{ch1} + (V_{s3} - V_{s1}) * i_{ch2}] \quad (5.9)$$

A partir de l'expression (5.3), en posant : $\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2$

$$\begin{bmatrix} I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \right\} \quad (5.10)$$

Ou alors :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} &= \frac{1}{\Delta} \left\{ \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} \\ &= \begin{bmatrix} I_{ch\alpha p} \\ I_{ch\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{ch\alpha q} \\ I_{ch\beta q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Les puissances instantanées selon les axes α et β peuvent s'écrire :

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} P_{\alpha} \\ Q_{\beta} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_{s\alpha} * I_{ch\alpha} \\ V_{s\beta} * I_{ch\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} * I_{ch\alpha p} \\ V_{s\beta} * I_{ch\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{s\alpha} * I_{ch\alpha q} \\ V_{s\beta} * I_{ch\beta q} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} P_{\alpha p} \\ P_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{\alpha q} \\ P_{\beta q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.12)$$

$$\begin{aligned} P_{\alpha p} &= \frac{V_{s\alpha}^2}{\Delta} * P & \text{et} & & P_{\alpha q} &= \frac{V_{s\alpha}^2}{\Delta} * q \\ P_{\beta p} &= \frac{V_{s\beta}^2}{\Delta} * P & \text{et} & & P_{\beta q} &= \frac{V_{s\beta}^2}{\Delta} * q \end{aligned} \quad (5.13)$$

$P_{\alpha p}$: Puissance instantanée active selon l'axe α .

$P_{\beta p}$: Puissance instantanée active selon l'axe β .

$P_{\alpha q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe α .

$P_{\beta q}$: Puissance instantanée réactive selon l'axe β .

D'après les expressions (5-13), on peut écrire :

$$P = P_{\alpha p} + P_{\beta p} + P_{\alpha q} + P_{\beta q} \quad (5.14)$$

L'analyse de l'équation (5.14) nous ramène aux conclusions suivantes :

- La somme des puissances instantanées $P_{\alpha p}$ et $P_{\beta p}$ coïncide avec la puissance instantanée dans un circuit triphasé.
- La puissance réactive correspond à la partie de la puissance instantanée qui dépend de q .
- Ces puissances $P_{\alpha q}$ et $P_{\beta q}$ s'annulent entre elles et elles n'apportent aucune contribution au transfert de puissance instantanée entre la source et la charge.

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

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (5.15)$$

- \bar{p} : puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant.
- \bar{q} : puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant.
- \tilde{q} et \tilde{p} : sont des puissances alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

a.2.Séparation des puissances perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Deux circuits constitués, l'un d'un filtre passe bas avec un soustracteur, et l'autre d'un filtre passe haut peuvent être employés. Les deux types de filtres d'extraction sont représentés dans la figure 5.7 suivante :

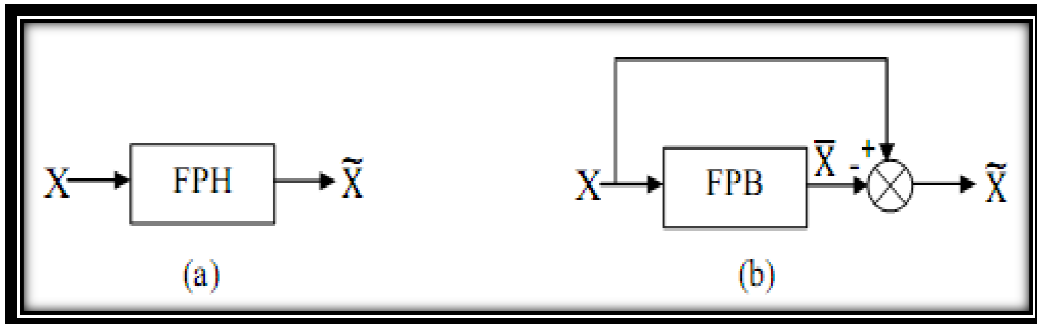


Figure 5.7 : Deux types classiques de filtres d'extraction de la composante harmonique

a.3. Calcul des courants perturbateurs

En considérant les équations (5-11) et (5-15) nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$ en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques :

$$\begin{bmatrix} I_{ch\alpha} \\ I_{ch\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{P} \\ \bar{Q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{Q} \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

Les courants harmoniques triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés $I_{ch\alpha,h}$ et $I_{ch\beta,h}$ par la transformation inverse de Concordia comme suit :

$$\begin{bmatrix} I_{ch1,h} \\ I_{ch2,h} \\ I_{ch3,h} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch\alpha,h} \\ I_{ch\beta,h} \end{bmatrix} \tag{5.17}$$

Si V et $I_{ch1,1}$ représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental et φ_1 , le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \bar{p} = 3VI_{ch1,1} \cos \varphi_1 \\ \bar{q} = 3VI_{ch1,1} \sin \varphi_1 \end{cases} \quad (5.18)$$

Les termes \bar{p} et \bar{q} sont respectivement équivalents à la puissance active et réactive conventionnelles.

De cette manière l'élimination des courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives \tilde{q} et \tilde{p} . La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue \bar{q} .

b-Régulation de la tension continue

La tension aux bornes du filtre n'est pas constante à cause de la sensibilité aux échanges de puissance entre la charge polluante et le réseau, c'est le filtre actif qui fournira la puissance nécessaire pour rétablir l'équilibre. Le régime transitoire de la charge polluante et les pertes dans les composants de puissance font aussi varier la tension aux bornes du condensateur.

Une boucle de tension s'avère alors nécessaire, car elle permet de maintenir la tension, coté onduleur, constante tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif et de limiter ses variations en régime dynamique afin de préserver les performances de la commande.

Pour maintenir la tension constante, il suffit de déterminer l'amplitude du courant actif I_0 qui est nécessaire pour produire la puissance active absorbée par le filtre et on l'ajoute aux références de courant.

c. Commande par hystérésis

Dans cette partie, on présente la commande par hystérésis ou bang-bang des onduleurs multi-niveaux. Le principe général de cette stratégie est de comparer le courant de référence I_{ref} au courant réel I_{reel} et à partir de l'écart entre les deux courants, on déduit la commande des interrupteurs du convertisseur.

Ce type de commande permet de fixer un courant de référence I_{ref} dans le récepteur.

On montre que les performances de cette stratégie sont fortement liées à la largeur, h , de la bande d'hystérésis, du point de vue poursuite de la référence. L'ondulation du courant est imposée par une bande d'hystérésis. D'une manière générale, cette stratégie permet une réaction rapide à des variations de la consigne ou des paramètres de la partie puissance.

Un comparateur à hystérésis mesure la différence entre le courant réel et sa référence. (figure 5.8)

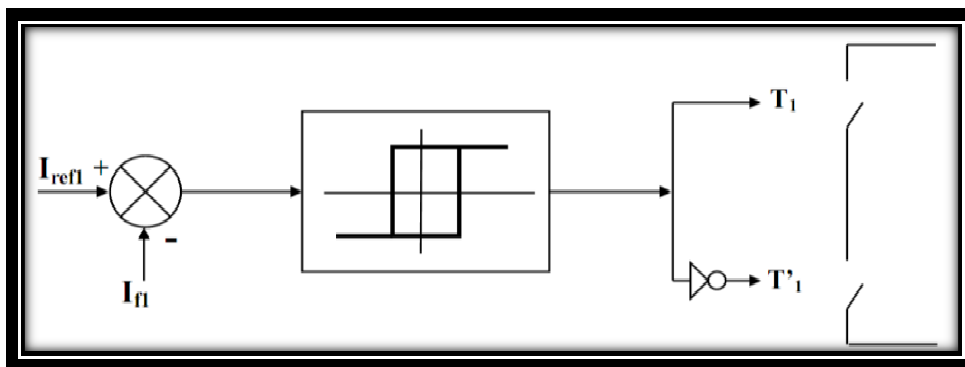


Figure 5.8: Commande par hystérésis.

Malgré sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse et sa bonne dynamique, cette commande présente certains inconvénients à savoir :

- La fréquence de commutation n'est pas fixe, elle dépend de la bande d'hystérésis et de la dérivée du courant.
- La somme des trois courants n'est pas forcément nulle, ce qui crée un déséquilibre des courants qui dépend de la bande d'hystérésis.
- Des composantes harmoniques basses fréquences, voire une composante continue, peuvent apparaître sur le signal de sortie. La composante continue est due au fait que la forme de l'alternance positive peut différer de celle de l'alternance négative, au signe près.

5.3. Résultats de simulation

Les courants consommés par la charge étant d'allures identiques, nous présentons les résultats de simulation pour une phase, en l'occurrence la phase 1.

5.3.1. Paramètres de simulation

Source

Tension efficace : $V_s=127V$

La fréquence : $f=50Hz$

Pulsation: $w=2\pi f$

Tension maximale: $V_{\max} = 220\sqrt{2} V$

Filtre passif

$L1=4mH$

$C1=186\mu F$

$r1=3\Omega$

Coté continu de l'onduleur

$R=300\Omega$

$C = 3.3mF$

Filtre de sortie

$L_f=0.1mH$

$R_f=1\Omega$

5.3.2. Résultats de simulation de réseau

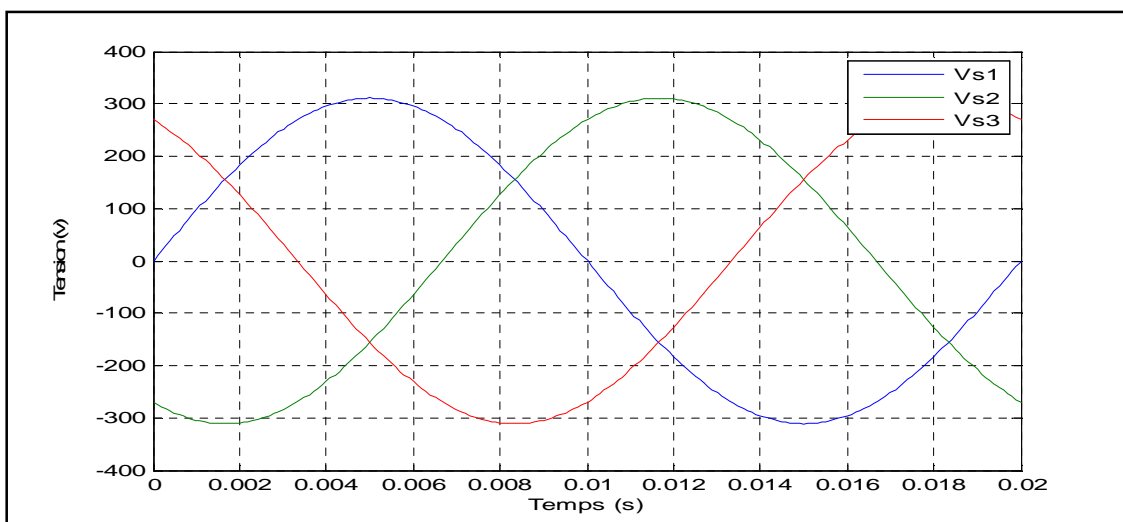


Figure 5.9 : Réseau triphasé équilibré

5.3.3. Résultats de simulation de la charge polluante avant

filtrage :(T=0.18s)

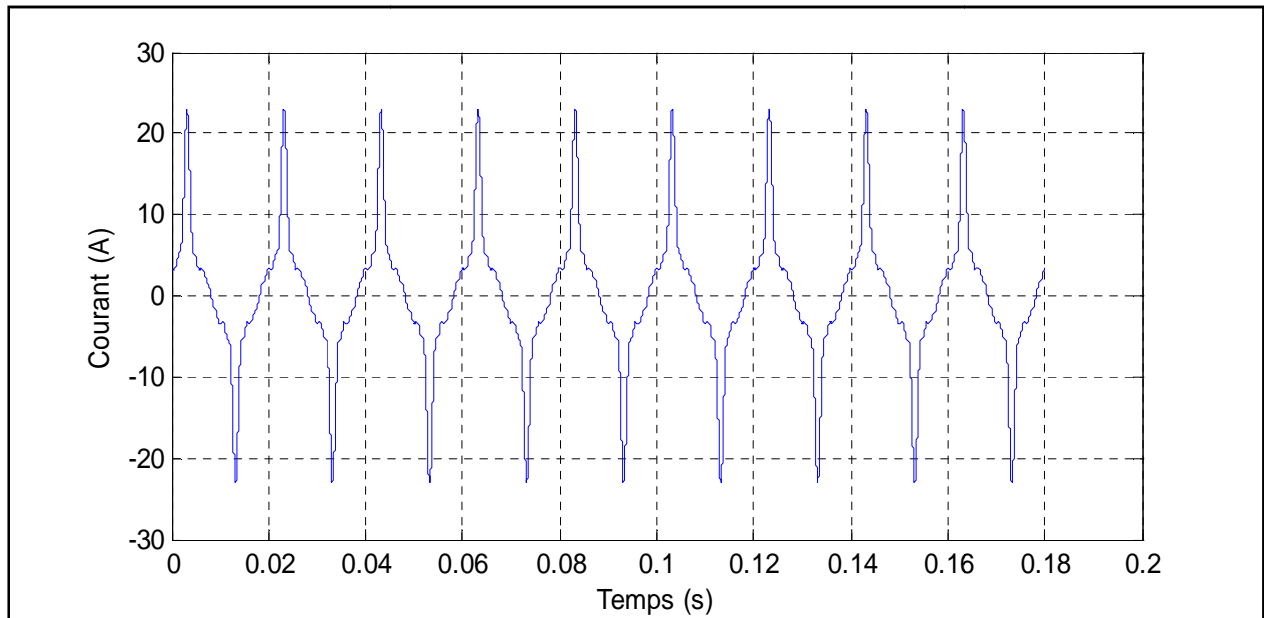


Figure 5.10: La forme du courant de charge avant filtrage.

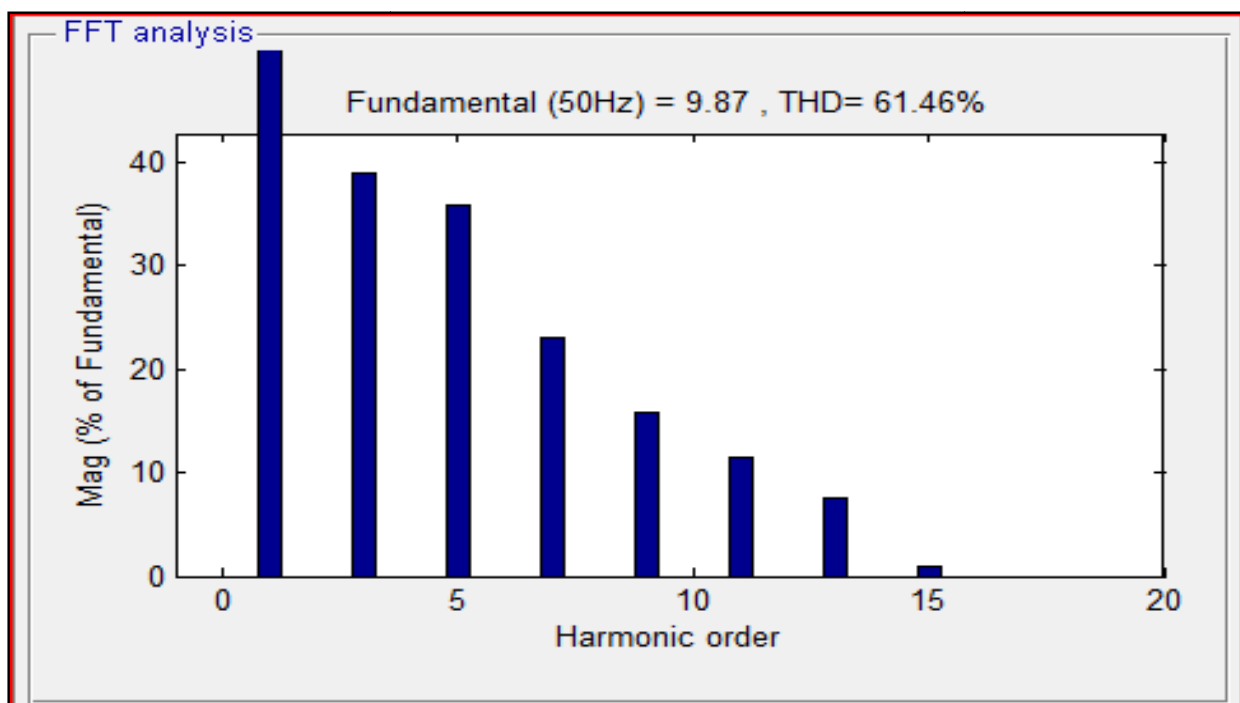


Figure 5.11 : Les spectres fréquentiels du courant de charge avant filtrage.

5.3.4. Modèle de simulation de l'identification des courants harmoniques :

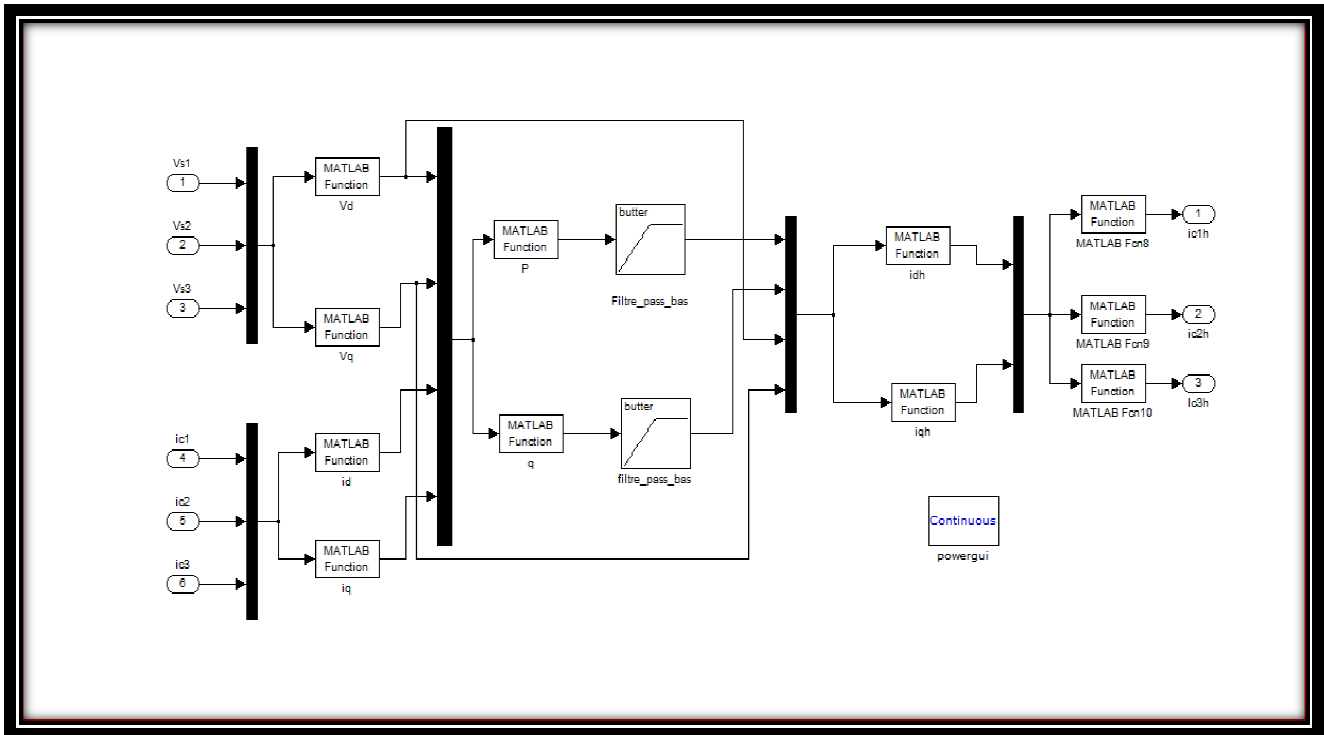


Figure 5.12 : Schéma de simulation de l'identification des courants harmoniques.

5.3.5. Résultat de simulation de l'identification des courants harmoniques :

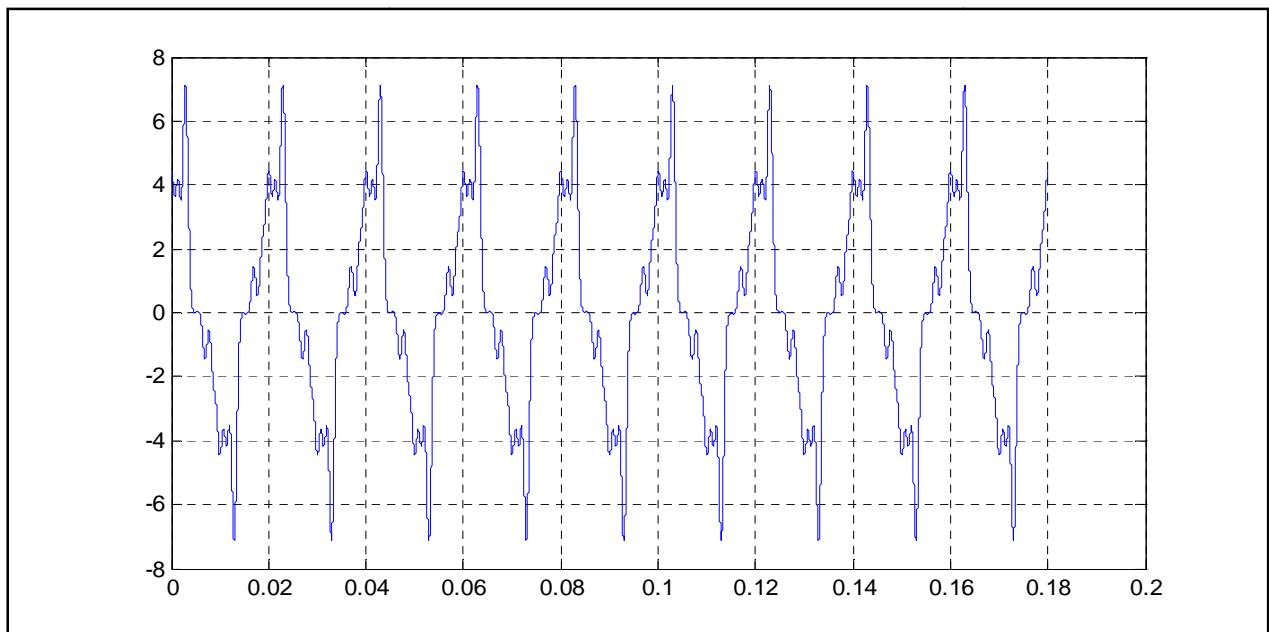


Figure 5.13: La forme du courant harmonique.

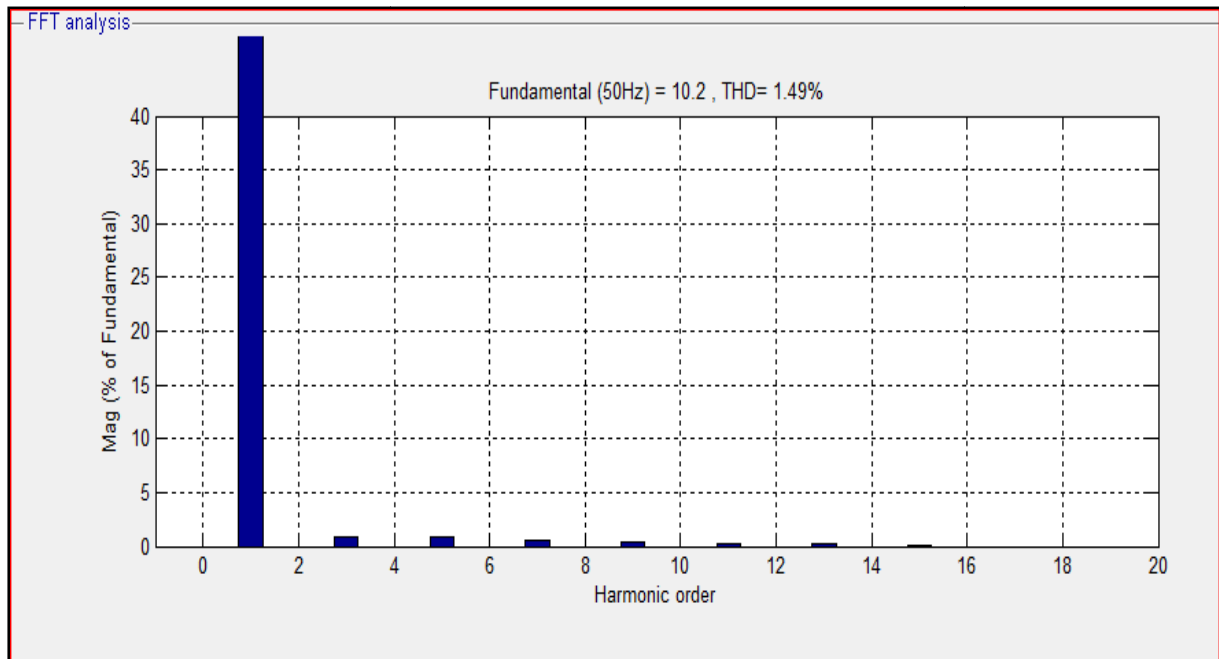


Figure 5.16 : Les spectres fréquentiels du courant de charge après filtrage.

Interprétation des résultats :

➤ La figure (5.10) montre que le courant de source avant filtrage est de forme alternative non sinusoïdale chargé des composantes harmoniques de rang $(2K+1)$. Ainsi, son taux de distorsion harmonique est de 61.46% (figure 5.11). Selon la norme (C.E.I) ce TDH est bien au-delà du seuil toléré par la norme, d'où la nécessité d'un filtrage.

➤ Après filtrage, le courant de charge prend une forme quasi sinusoïdale, comme le montre la figure (5.12), son taux de distorsion harmonique est de $TDH=1.49\%$ et d'après la norme (C.E.I) ce TDH il est acceptable.

➤ Conclusion

Dans le but d'étudier le comportement du filtre actif parallèle, nous avons procédé à la modélisation de l'ensemble, réseau-filtre-charge polluante, qui nous a permis de décrire le fonctionnement complet du filtrage actif par des équations mathématiques. Une étape indispensable pour la simulation de notre système avant sa mise en pratique. L'utilisation du filtre actif parallèle commandé par hystérésis est nécessaire pour avoir une bonne amélioration de la qualité du courant avec un taux de distorsion harmonique nettement minimisé.

Conclusion

générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié deux méthodes différentes de filtrage des harmoniques dans un réseau triphasé industriel d'impédance de court-circuit non négligeable, pollué par une charge non linéaire.

Après avoir présenté l'influence des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques, nous avons passé en revue les différentes solutions utilisées pour atténuer les problèmes des harmoniques, afin d'assurer la sécurité du matériel électrique.

Nous avons présenté dans le quatrième chapitre, le filtre passif, qui consiste à placer en parallèle une impédance très faible accordée sur la fréquence du rang harmonique à éliminer. Cette méthode, est facile à mettre en œuvre et peu coûteuse mais elle se limite à l'atténuation d'harmoniques d'un rang bien déterminé, ce qui limite son effet. Cette solution s'avère parfois inactive, à cause de la dérivation de la fréquence de résonance qui est due soit au changement de la structure du réseau ou bien au vieillissement des composantes du filtre passif.

Dans le cinquième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude des nouveaux dispositifs de dépollution des réseaux électriques. Notre travail s'est penché plus particulièrement sur le filtrage actif parallèle. Dans un premier temps, nous avons présenté la méthode d'identification des courants harmoniques basée sur la logique des puissances active et réactive instantanées. Ces courants constituent des références pour le filtre actif et déterminent ses performances. Pour la commande de notre filtre, nous avons utilisé la commande par hystérésis, celle-ci s'avère beaucoup plus performante car elle est moins sensible aux variations paramétriques. Après la simulation, on voit que les résultats obtenus sont meilleurs que ceux du filtre passif, avec un TDH=1.49%.

Bibliographie

[1] T.Gauroud.

« Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des reseaux de distribution d'énergie électrique». Thèse de doctorat de l'université de Nantes, janvier 1997.

[2] E.Felice

« Perturbations harmoniques, effets, origines, mesures, diagnostic, remèdes» DUNOD, Paris, 2000.

[3] T.Deflandre, P.Mauras «Les harmoniques sur les réseaux électriques» Direction des étude et recherches de EDF.EYROLLES, Paris, 1998.

[4] S.CHALLAH, N.YASSA.

« Analyse de la propagation harmonique dans un réseau électrique». Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2005.

[5] N.HANED, M.HADJI.

« Evaluation des pertes de puissances dues aux harmoniques dans un réseau électrique» Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2006.

[6] M.FERHI, S.MONSOURI.

«Étude expérimentale des perturbations harmoniques générées par des redresseurs: Application à un laboratoire d'électronique de puissance» Mémoire d'ingénieur, U.M.M.T.O, 2006.

[7] Schneider Electric cahiers techniques

N° 141 : « Les perturbations électriques en basse tension»

N° 183 : « Harmoniques: convertisseur propre et compensateur actif»

N° 152 : « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement »

N° 199 : « La qualité de l'énergie électrique».

N° 199 : « L'alimentation des circuits d'éclairage »

[8] M. Aoues

« Filtrage actif des harmoniques générés par un redresseur triphasé » Mémoire de magistère, U.M.M.T.O, 2000.

[10] H.Kouara

« Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension »
Mémoire de magistère, Université de Batna, Février 2006.

[11] C.RIZET

« Améliorations du rendement des alimentations sans interruptions » Thèse de doctorat,
Université de Grenoble, 2006.

[12] T.BENSLIMANE

« Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome » Mémoire de Magister,
Université de Bechar, 2004.

[13] Guide de SONATRACH

[14] A.BELLADI

« Proposition d'un filtre de courant harmonique dans la salle de contrôle de R.E.B »
Mémoire d'ingénieur, Université de Boumerdes, 2012.

[15] H.DJAGHLOUD

« Filtrage actif de puissance » Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2007.

[16] M. Damien Flieller

« Etude de stratégies de commande d'un filtre actif de type parallèle en vue d'assurer la compensation des harmoniques et du déséquilibre » Mémoire de Magister, Université Catholique de Louvain, 2006.

Mots clés

R.E.B : Rhoud El Baghel

ASI : Alimentation Sans Interruption

API : Automate Programmable Industriel

MLI : Modulation de la Largeur d'Impulsion

IGBT : Interced Grace Bipolaire Transistor

Résumé

L'objet de notre travail consiste essentiellement à identifier et filtrer des courants harmoniques générés par une alimentation sans interruption (salle de contrôle dans l'usine de REB).

De manière à mettre en évidence les différentes parties constituant ce mémoire, ce dernier sera divisé en cinq chapitres.

Dans un premier temps, le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les perturbations en courant pouvant intervenir dans un réseau électrique alimentant des charges non linéaires.

Ensuite, dans le second chapitre, nous présenterons les différentes solutions de dépollution (remèdes) pour minimiser les perturbations harmoniques.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation d'une alimentation sans interruption.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons la simulation d'un filtre passif.

Le dernier chapitre traitera une simulation d'un filtre actif parallèle.
