

Cours

Qualité de l'énergie électrique

I.1 Introduction

Le distributeur d'énergie électrique a pour objectif de fournir un système de tensions sinusoïdales triphasées équilibrées à l'ensemble des consommateurs. Par contre l'utilisation intensive des convertisseurs statiques a conduit à l'augmentation de la pollution harmonique dans les réseaux électriques et une consommation importante de la puissance réactive. Cette dégradation peut être créée aussi par des dysfonctionnements de matériels sur le réseau tel que la saturation des transformateurs, création de pertes supplémentaires dans les lignes de transport, ...).

Ce chapitre a pour objectif d'étudier, les origines des perturbations électriques et leur effet sur les réseaux électriques. Ensuite, nous présentons les solutions classiques utilisées pour limiter cette pollution. Finalement, nous étudions les compensateurs actifs des harmoniques comme nouvelle solution qu'on peut utiliser dans de nombreux cas.

I.2 Les perturbations électriques

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension caractérisée par sa fréquence, son amplitude et sa forme d'onde qui doit être sinusoïdale. La qualité de la tension peut être affectée, soit par des perturbations aléatoires à caractère accidentel, soit par des perturbations existantes en permanence ou pendant des instants de durées bien déterminées. Ces perturbations sont classées comme suit :

I.2.1 Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution de son amplitude (entre 10% à 90% de la tension nominale) pendant un temps de 10 millisecondes jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus en général à des défauts dans les réseaux publics ou ceux des utilisateurs. Ils apparaissent aussi lors des manoeuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de brève est une disparition totale de la tension pendant une courte durée qui n'excède pas une minute. Ces coupures sont dues au fonctionnement du système de protection des réseaux aériens évitant ainsi des coupures longues .

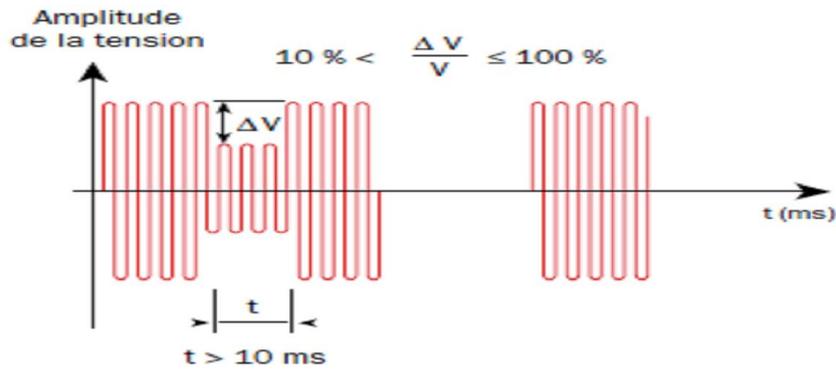


Figure I-1 Creux et coupures de tension

I.2.2 Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes.

L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale. Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière.

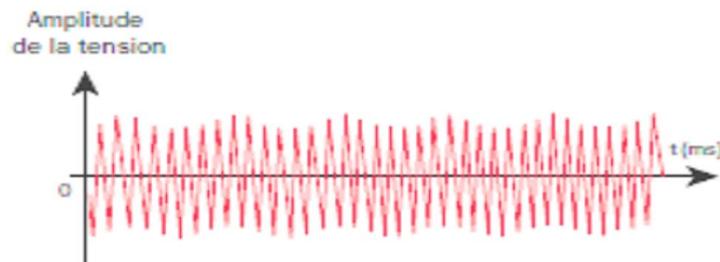


Figure I-2 Variations rapides de la tension.

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé.

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau.

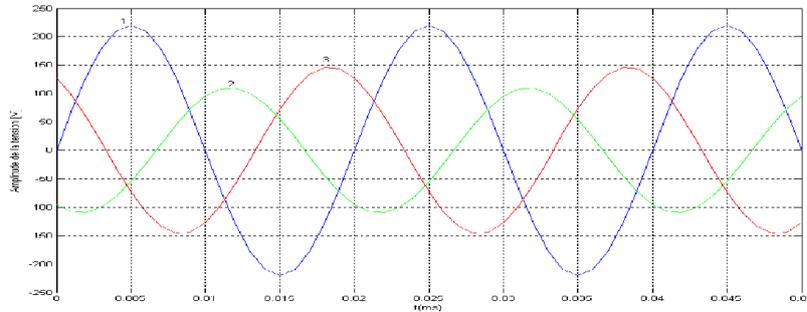


Figure I.3 : Déséquilibre des tensions

I.2.4 Variation de fréquence

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$.

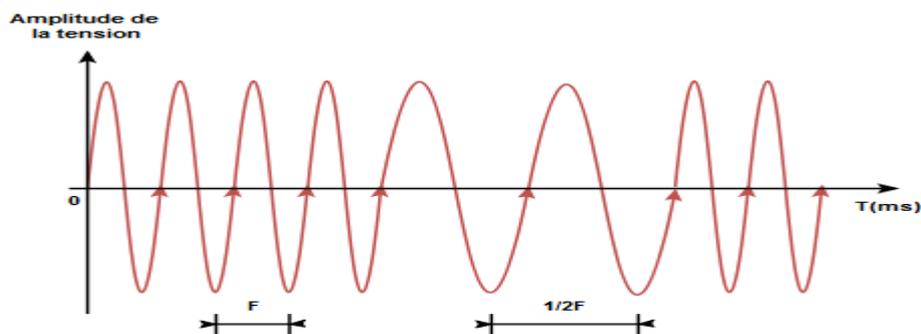


Figure I-4 Fluctuation de la fréquence

I.2.5 Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits.

I.2.5.1 Harmoniques et interharmoniques

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entières du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques.

Les interharmoniques sont superposées à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau.

I.2.5.2 Sources des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires, ou des charges déséquilibrées branchées au réseau.

Une charge est dite linéaire si, alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non sinusoïdal. Par la suite, nous nous restreindrons aux charges non-linéaires triphasées, qui consomment un courant périodique, de même période que celle de la tension.

I.2.5.3 Décomposition d'un signal

L'analyse de Fourier permet de quantifier la distorsion harmonique d'un signal. Un signal périodique (tension ou courant) de forme quelconque et de fréquence f_0 se décompose en une somme de signaux sinusoïdaux dont chacun a une fréquence, dite harmonique, qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale f_0 .

Un exemple de cette décomposition est donné sur la figure suivant.

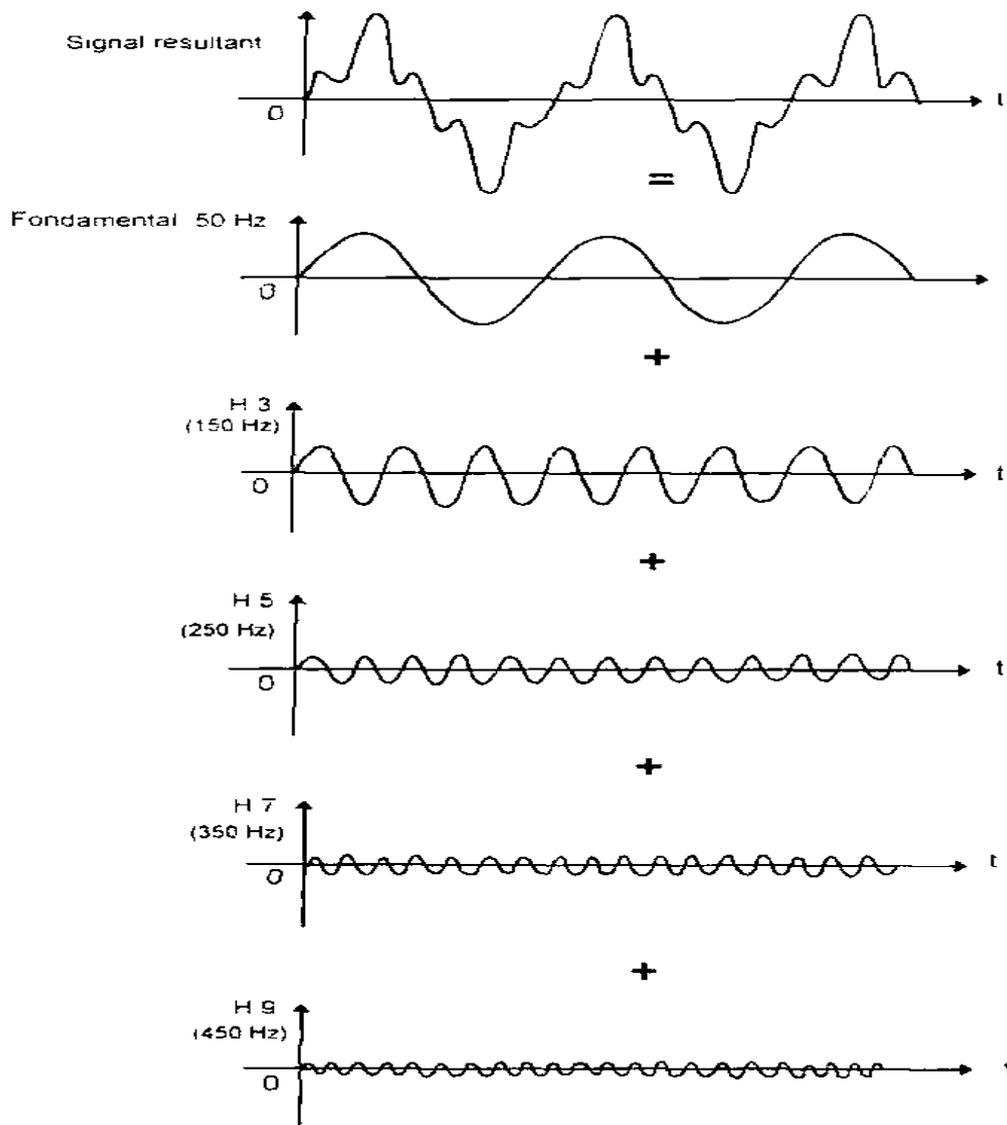


Figure I.5 : Décomposition d'un signal périodique 50 Hz

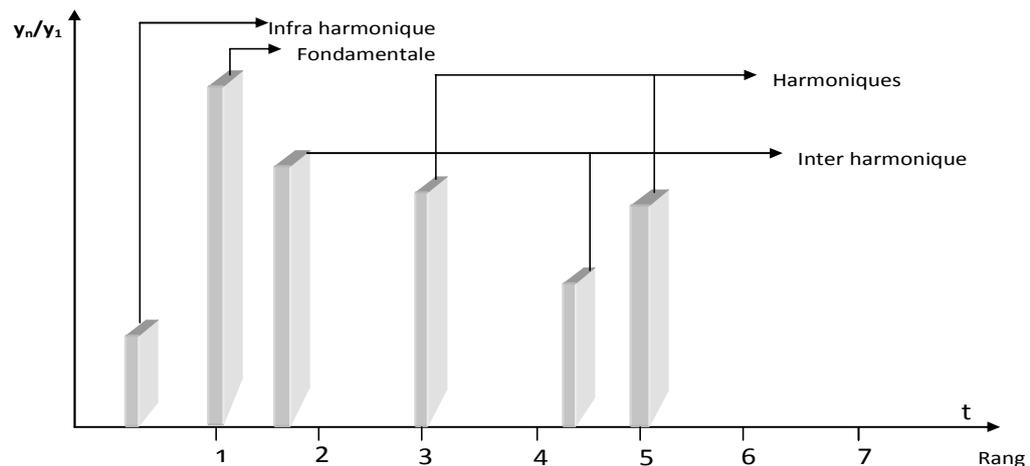


Figure I-6 : Représentation spectrale d'un signal périodique

I.2.5.4 Conséquences néfastes des harmoniques

Les tensions et les courants harmoniques ont des effets indésirables et néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques :

- Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- Lignes : pertes ohmiques supplémentaires.
- Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet Joule et dans le noyau par courant de Foucault.
- Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus l'échauffement du moteur.
- Condensateur de puissance : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissement rapide du condensateur.
- Equipement de l'électronique de puissance : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.
- Ordinateurs : troubles fonctionnels liés à la distorsion de la tension

I.2.5.5 Caractérisation des perturbations harmoniques

Différentes grandeurs sont définies pour caractériser la distorsion en régime harmonique. Le taux global de distorsion harmonique ou total harmonic distortion en anglais (*THD*) et le facteur de puissance sont les plus employés pour déterminer les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive.

a. Le taux de distorsion harmoniques

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge contient des composantes harmoniques.

Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour déterminer le niveau de pollution harmonique sur les réseaux électriques.

Le *THD* s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (I-1)$$

D'où I_1 est la valeur efficace du courant fondamental et I_h les valeurs efficaces des différentes harmoniques de courant.

b. Le facteur de puissance

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

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

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant.

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S .

En régime non sinusoïdal, les harmoniques créent une puissance déformante qui diminue le facteur de puissance. Tandis que, en régime sinusoïdal équilibré, la puissance déformante est nulle.

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I-3})$$

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

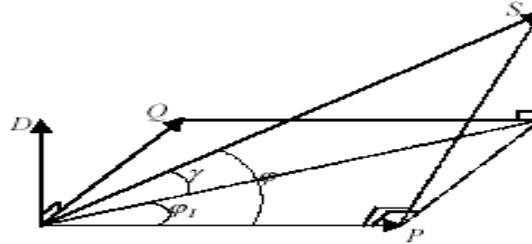


Figure I.7 : Diagramme de Frenel des puissances

I.3 Normes et réglementations

Pour éviter tous les problèmes générés par la présence des courants et des tensions harmoniques sur le réseau et pour le préserver de la pollution harmonique, les utilisateurs doivent respecter un certain nombre de normes qui sont résumées dans les tableaux (I-1) et (I-2).

Rang impair non multiple de 3		Rang impair multiple de 3		Rang pair	
Rang	Tension harmonique%	Rang	Tension harmonique%	Rang	Tension harmonique%
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1.5
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2 + 12.5/n$				

Tableau (I-1): Valeurs des niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques dans les réseaux d'énergie à basse tension (CEI 1000-2-4)

Rang impair	Courant harmonique maximal autorisé (A)	Rang pair	Courant harmonique maximal autorisé (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	8 ≤ n ≤ 40	
11	0.33		
13	0.21		
15 ≤ n ≤ 39	0.15 * 15/n		

Tableau (I-2): Limites pour les émissions de courant harmonique (CEI 1000-3-2)

I.4 Solution de réduction des perturbations

Plusieurs méthodes sont utilisées pour réduire la pollution harmonique dans les réseaux électriques. Parmi ces méthodes, le surdimensionnement des éléments composant le réseau, l'utilisation de transformateurs spéciaux, le filtrage passif et actif. Les deux dernières méthodes sont les plus répandues.

I.4.1 Stratégies classiques

I.4.1.1 Agir sur la structure de l'installation

Eviter la connexion d'un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur tel que les redresseurs, si le pollueur est de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur.

I.4.1.2 Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide d'un transformateur à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques.

I.4.1.3 Inductances (selfs) série

Cette méthode est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire.

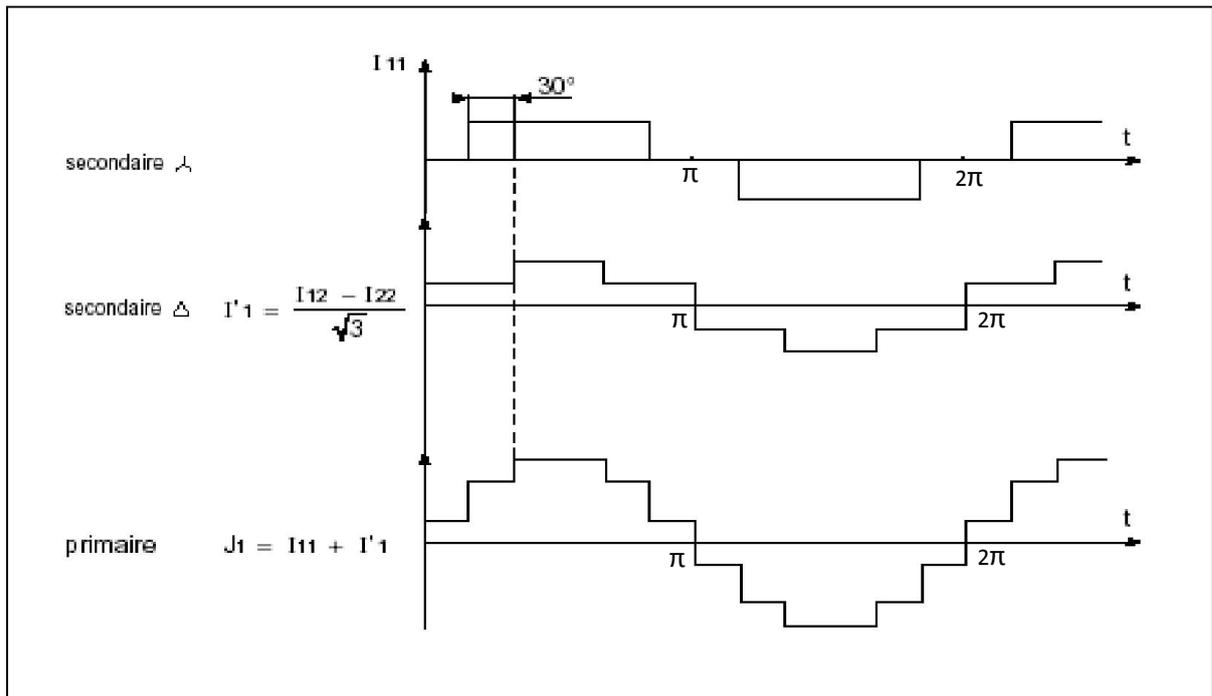
I.4.1.4 Augmentation de l'indice de pulsation du convertisseur

Cette méthode consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimente un redresseur en pont de Graëtz, réalisant ainsi un redressement hexaphasé.

Les redresseurs doivent fournir des courants continus identiques afin que les courants alternatifs qu'ils prélèvent sur les secondaires des transformateurs aient les mêmes valeurs.

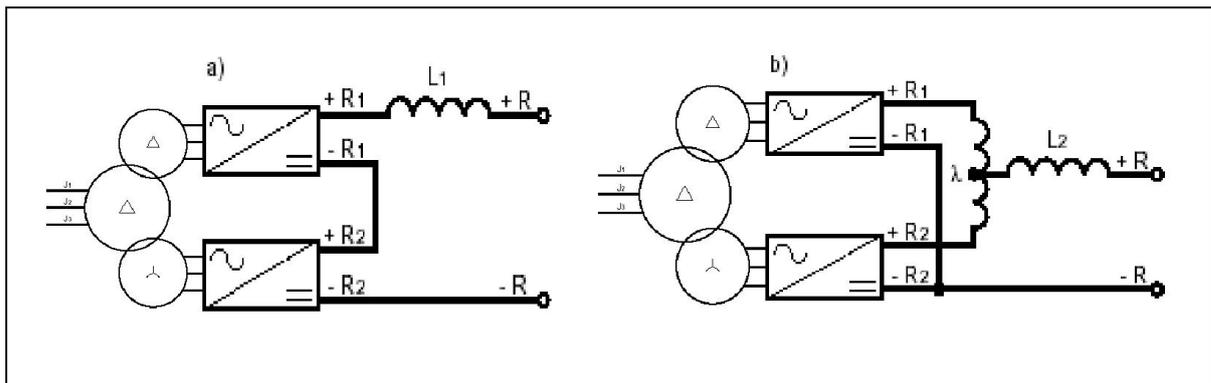
Dans ces conditions, il y a une recombinaison des courants harmoniques, générés par chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair (les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes) sont éliminés. 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 ayant une faible amplitude avec un effet moins important.

La figure(I-8) donne le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires .



Figure(I-8): Forme des courants absorbés.

Le courant de ligne a une forme beaucoup plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur. Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle.



Figure(I-9): Montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.

I.4.1.5 Filtrage passif

Le filtrage est réalisé par la mise en parallèle avec l'impédance du réseau d'un circuit de très faible impédance par rapport à l'impédance du réseau à la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Le courant choisit le chemin le moins résistant et de ce fait l'harmonique sera dévié à travers ce dernier.

I.4.1.5.1 Filtre résonant

Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court circuit pour l'harmonique considéré.

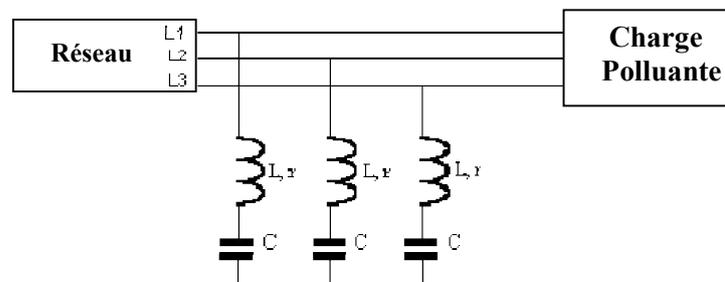


Figure (I-10): Branchement d'un filtre résonant

I.4.1.5.2 Filtre amorti

Un filtre amorti est composé 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 utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut.

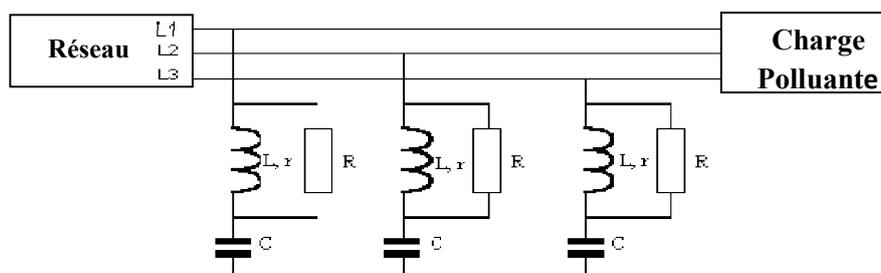


Figure (I-11): Branchement d'un filtre amorti

I.4.1.6 Inconvénients des filtres passifs

Le filtrage passif est intéressant par le principe mais possède les inconvénients suivants:

- La variation de l'impédance de la source influe considérablement sur les caractéristiques de filtrages.
- La résonance parallèle entre le filtre passif et la source produit des amplifications de courants harmoniques du côté de la source à des fréquences spécifiques.
- Le fonctionnement en parallèle de plusieurs filtres passifs accordés sur un rang théoriquement égal, entraîne la circulation de courants harmoniques très importants qui provoquent rapidement leur destruction.
- La présence d'un filtre harmonique raccordé à un réseau d'un niveau de tension donné nécessite de déconnecter tous les condensateurs raccordés au même réseau sous peine de destruction.

I.4.2 Stratégies modernes

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs tel que les IGBTs, MOSFETs, commutant des puissances de plus en plus élevées à des fréquences plus importantes, a permis de trouver de nouvelles solutions aux problèmes de perturbations des réseaux. Les inconvénients des solutions classiques telle que le filtrage passif (antirésonance, surcharges et forte dépendance de l'environnement,...) ont conduit à la conception de nouvelles structures " auto-adaptatives " pour la suppression des harmoniques appelées filtres actifs.

Le principe du filtrage actif est d'injecter des courants (ou des tensions) harmoniques en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser.

Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- ◆ Le filtre actif parallèle (FAP) (shunt active filter) : conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- ◆ Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.

- ◆ La combinaison parallèle-série actifs : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

I.4.2.1 Le Filtre actif parallèle (FAP)

Il est aussi appelé compensateur shunt, connecté en parallèle sur le réseau de distribution (figure (I-3)). Il est souvent commandé comme un générateur de courant. Il restitue dans le réseau électrique les courants harmoniques i_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau i_s soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. Son indépendance vis-à-vis de la source et de la charge lui assure l'auto- adaptabilité, la fiabilité et la bonne performance [4].

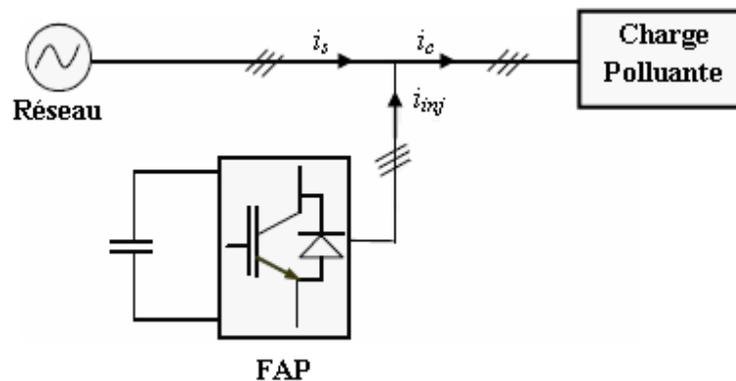


Figure (I-12): Filtrage actif parallèle

I.4.2.2 Le Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau (figure (I-4)). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en oeuvre : elle ne permet pas, par exemple, de compenser les courants harmoniques consommés par la charge .

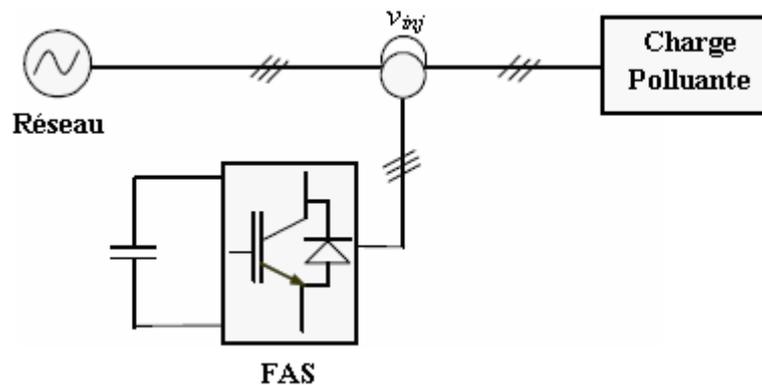


Figure (I-13): Filtrage actif série

I.4.2.3 La combinaison parallèle-série actifs

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série (figure (I-5)). Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle-série actifs ou Unified Power Quality Conditioner (UPQC). L'UPQC possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèle et série .

Le filtre actif série, lorsqu'il est placé en amont du filtre actif parallèle comme montré sur la figure (I-5), permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices. Lorsqu'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée.

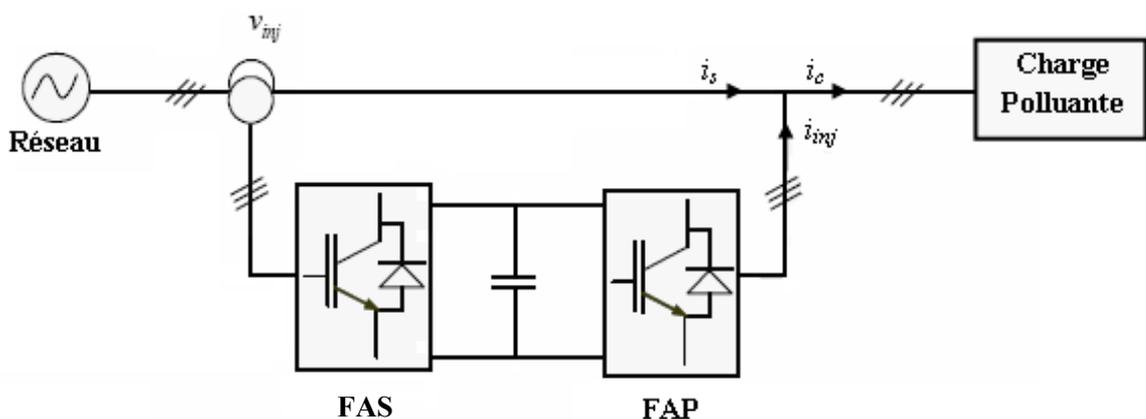


Figure (I-14): Combinaison des filtres actifs série et parallèle

Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs avec cette fois-ci les filtres passifs. Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût. On peut citer trois configurations :

- ◆ filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- ◆ filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- ◆ filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations affectant le réseau électrique et qui ont des effets néfastes sur les équipements électriques. En outre, nous avons montré les différentes solutions existantes pour la dépollution harmonique.

L'onduleur triphasé à trois bras jouant le rôle d'un filtre actif est considéré comme la solution la plus utilisée dans l'industrie.

Dans le chapitre qui suit nous allons étudier les méthodes d'identification des courants et tensions harmoniques ainsi que les différentes lois de commandes des onduleurs de tension.

Cours

Qualité de l'énergie électrique

Chapitre II- Filtrage actif parallèle

III.1 Introduction

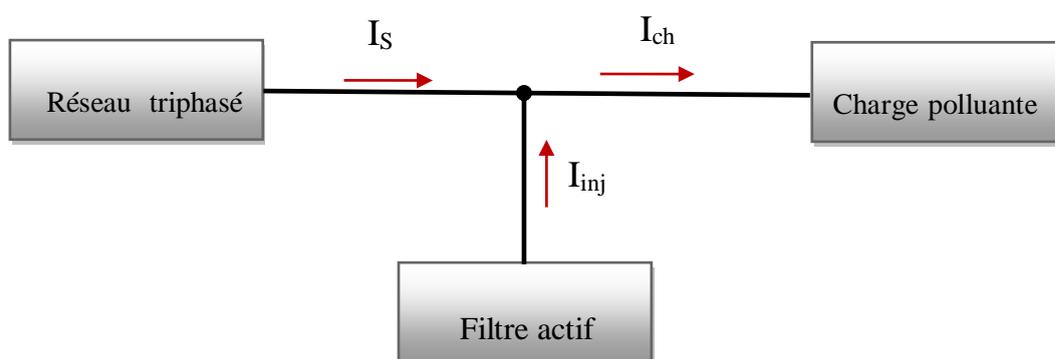
Le filtrage actif parallèle de puissance (FAP) est une solution moderne et adéquate permettant de remédier aux perturbations en courant. Ce compensateur peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et le fondamental réactif. Il s'insère entre le réseau et la charge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

Les objectifs de ce chapitre sont de comprendre la structure du filtre actif parallèle ainsi que son fonctionnement général. Nous examinerons le rôle des multiples éléments le composant et aussi, nous nous ferons présenter ces principaux types de commande.

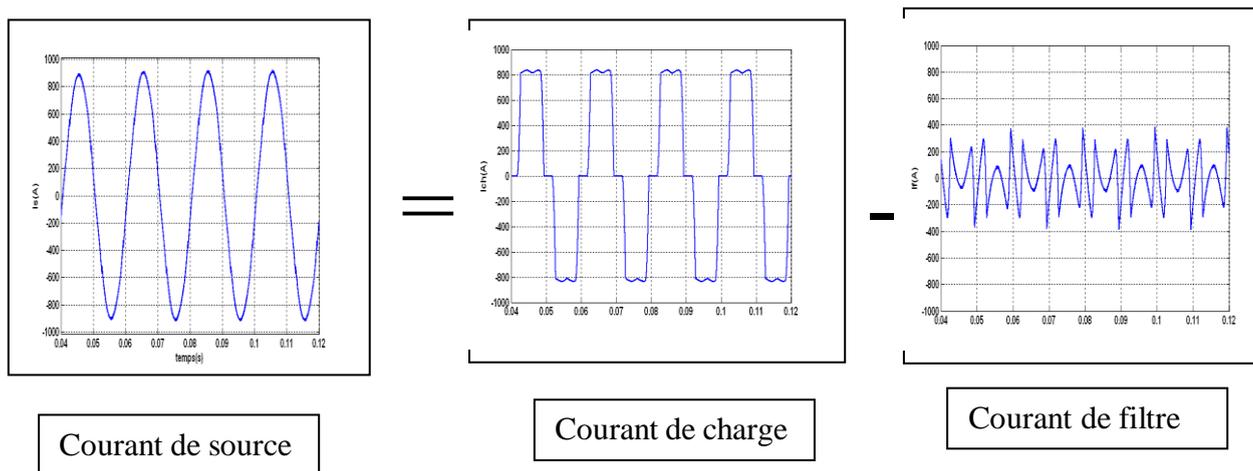
III.2 Principe de filtre actif parallèle

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire.

En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables [10]. Sa structure est la suivante :



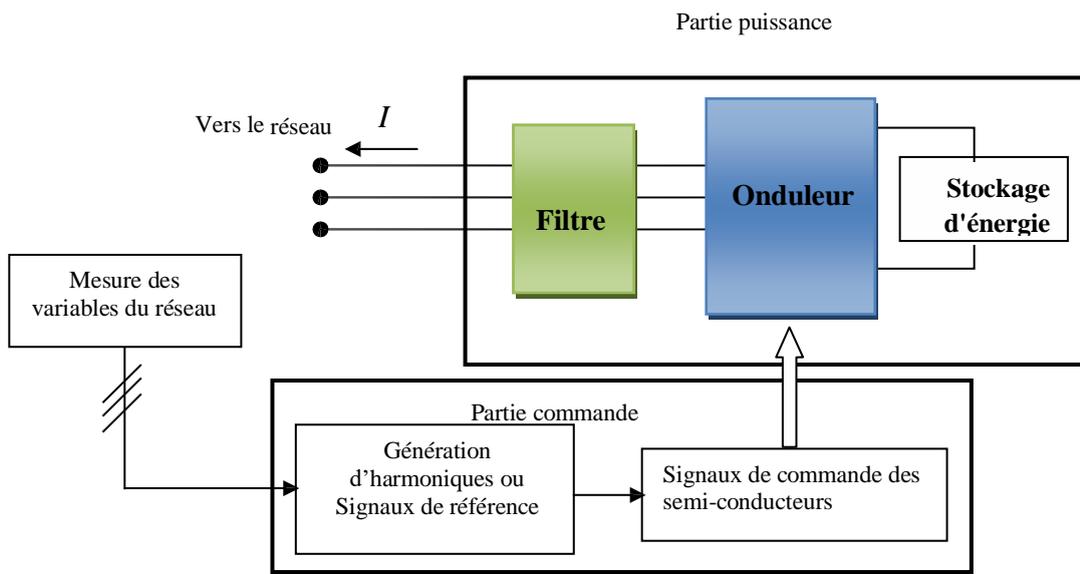
Fig(II.1) : Principe du filtre actif parallèle



Fig(II.2) : Courant de source, charge et filtre.

Nous distinguons donc deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Nous nous intéressons uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension.

Le filtre actif se compose de deux parties distinctes: La partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle des courants injectés au réseau ainsi que la commande des interrupteurs.



Fig(II.3) : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle

III.3 La partie puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la figure (II.4) On y distingue trois éléments :

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

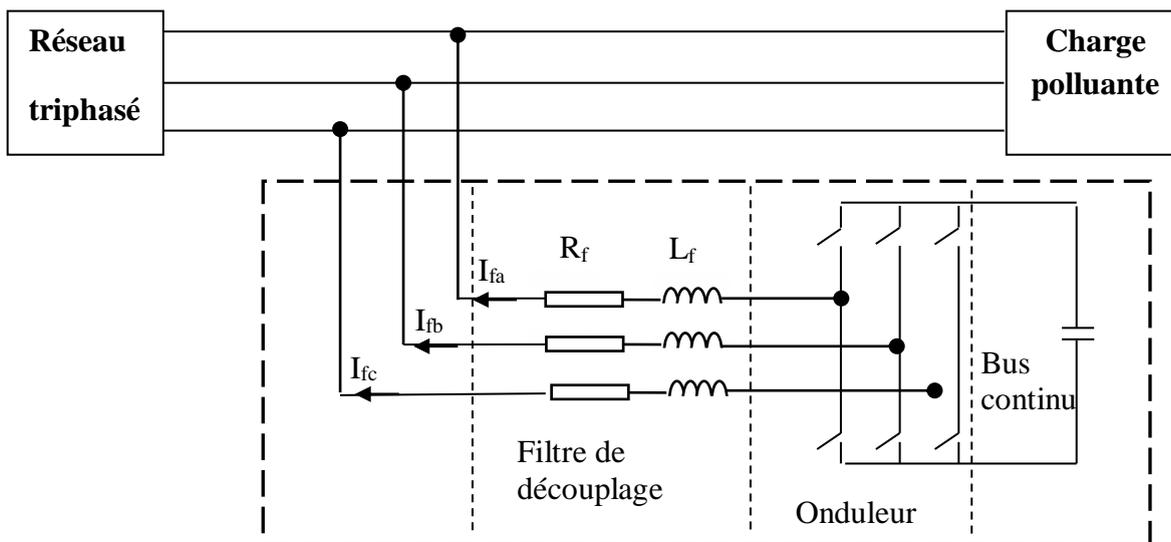


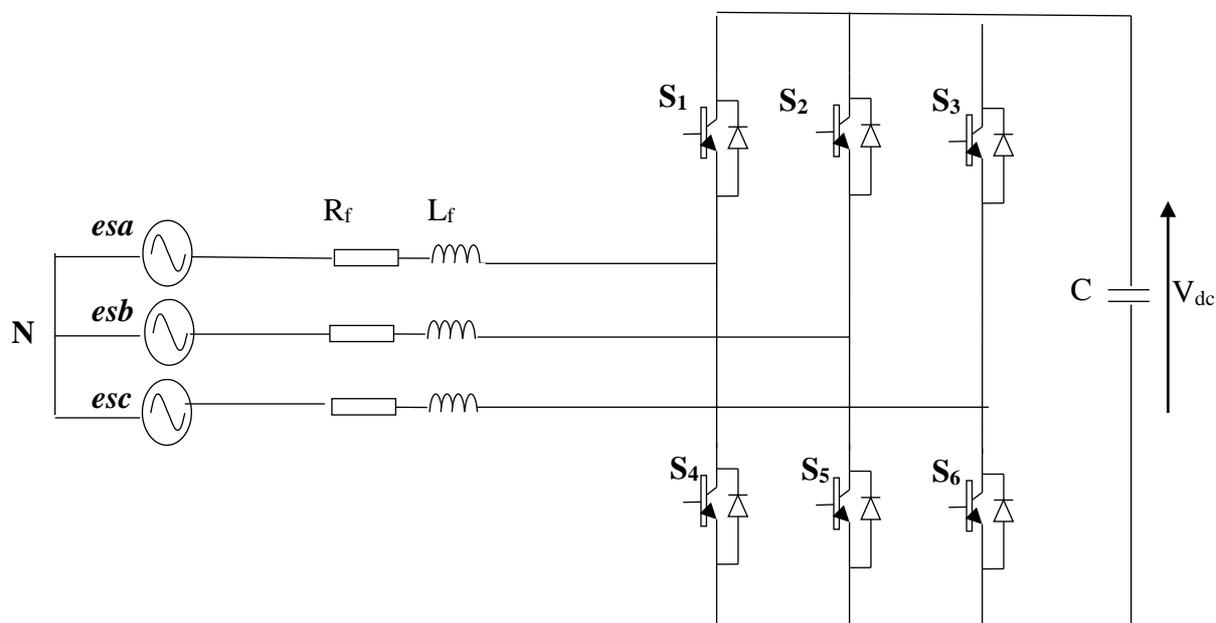
Fig (II.4) : schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

La figure (II.5) présente le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage (L_f, R_f). La capacité C se comporte comme une source de tension continue. La tension V_{dc} aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif.

III.4. 1 L'onduleur de tension

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

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



Fig(II.5) : Filtre actif à structure tension

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure(II.5) dépendent de l'état de trois signaux de commande (T_1 , T_2 , T_3), définis ci-dessous :

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

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

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

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables T_1 , T_2 et T_3 , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau (II.1).

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

Tableau (II.1):Tensions de sortie de l'onduleur.

III.4.2 Filtre de découplage

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [4]. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations.

Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance L_f de résistance interne R_f , comme le montre la figure (II.5). Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre.

III.4.3 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc} et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Le condensateur du côté continu a deux fonctionnalités principales :

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

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

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

III.5 Contrôle des courants du filtre actif (partie commande)

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

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

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

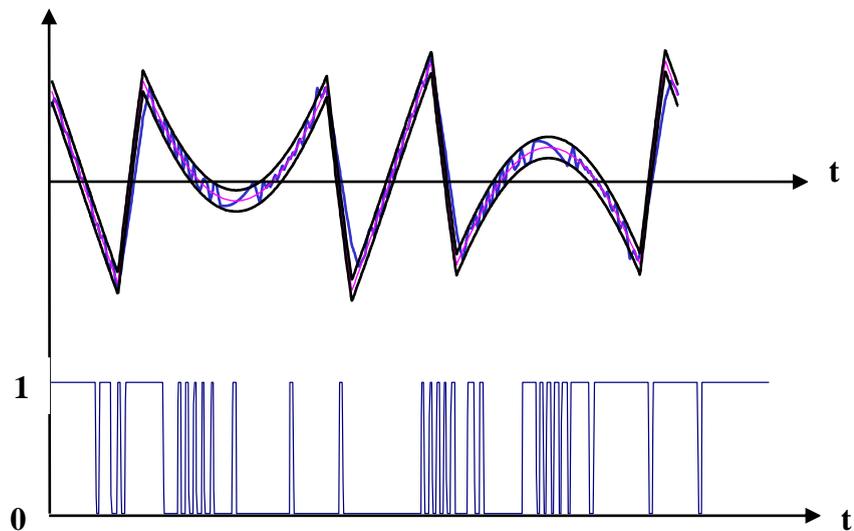
L'objectif de la commande, que se soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence.

III.5.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis appelée tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis ,une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal . Chaque sortie de ce gabarit entraîne un changement de configuration des interrupteurs figure (II.7). Ce système de contrôle est caractérisé par une fréquence de commutation variable. La mise en œuvre de cette stratégie de contrôle est relativement simple.

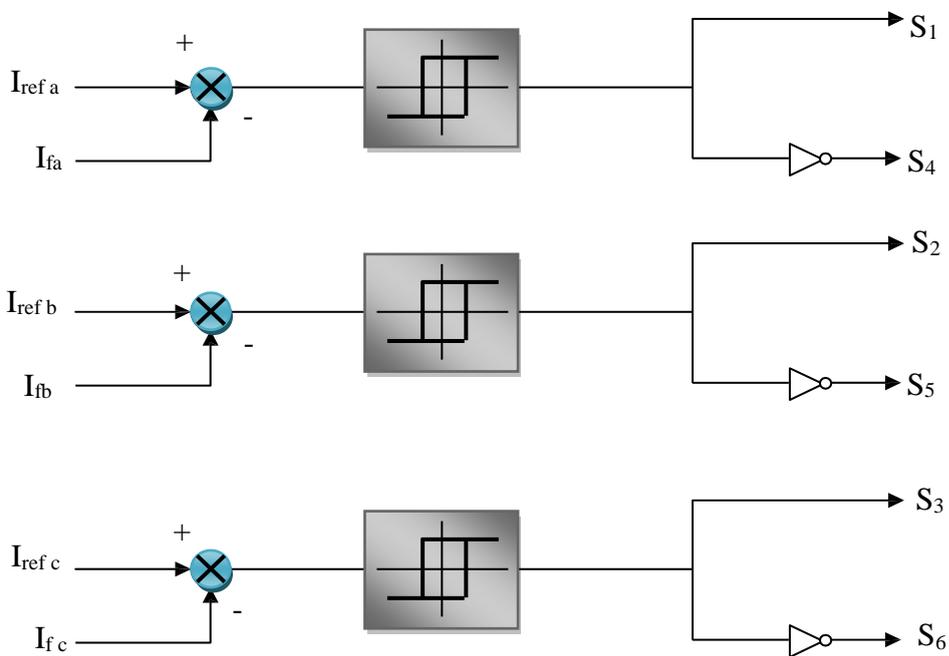
Le choix de la bande d'hystérésis doit tenir compte d'un certain nombre de condition liées au fonctionnement de l'onduleur, parmi lesquelles la fréquence de commutation admissible pour les composants semi-conducteurs.

Dans notre mémoire on va utilise ce type de commende car les performances de compensation par la commande hystérésis sont meilleures, en dynamique et en statique.



Fig(II.6) : Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la figure (II.7) :

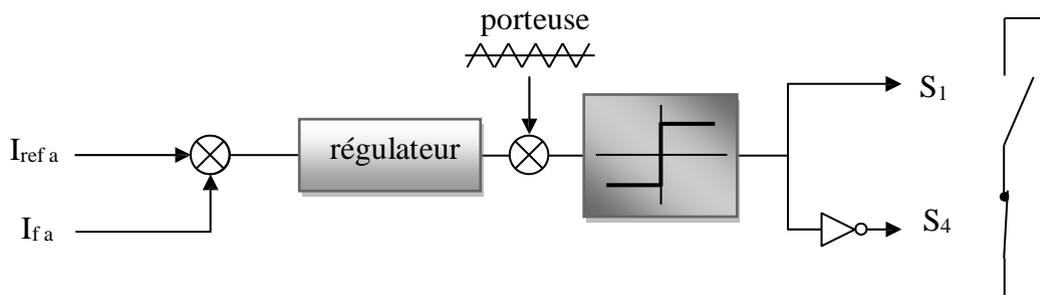


Fig(II.7) : Principe de la commande du courant par hystérésis.

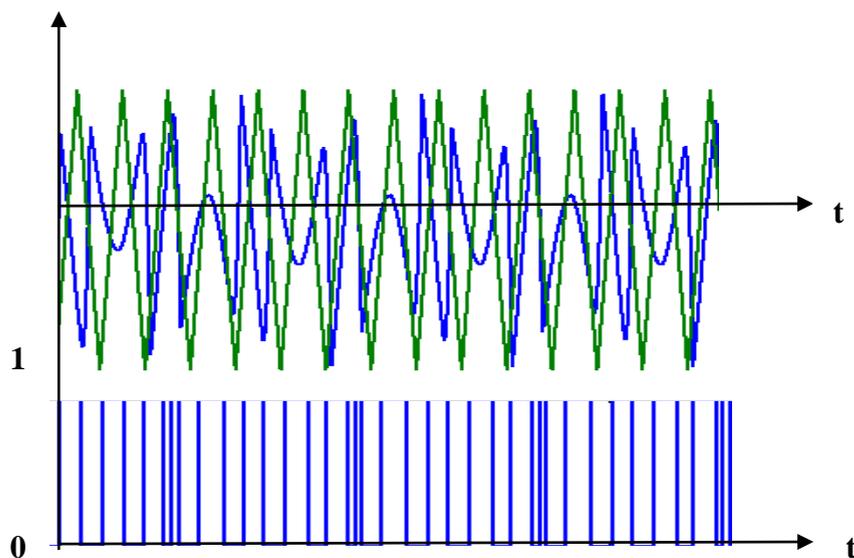
III.5.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

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

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure (II.8).



Fig(II.8) : Principe de commande par MLI



Fig(II.9) : Signal de commande et référence

III.6 Calcul des paramètres du système (réseau-filtre actif-charge polluante):

Le réseau a pour puissance apparente nominale S_n et tension efficace simple V_n (la tension efficace composée $U_n = \sqrt{3} V_n$).

$$\text{Le courant nominale } I_n \text{ est égal donc à: } I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n} = \frac{S_n}{3V_n} \quad (\text{II.1})$$

$$\text{L'impédance nominale du réseau est donnée par : } Z_n = \frac{U_n^2}{S_n} \quad (\text{II.2})$$

L'impédance Z_{cc} de court-circuit du réseau est généralement égal à 2% de Z_n cette impédance exprimée complexe nous donne: $Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega$ (II.3)

La résistance de court-circuit R_{cc} a pour valeur 10% de La réactance du court-circuit $L_{cc}\omega$.

$$Z_{cc} = R_{cc} + jL_{cc}\omega = R_{cc} + j10. R_{cc} = R_{cc} \cdot (1 + j10) \quad (\text{II.4})$$

En module:

$$|Z_{cc}| = \sqrt{101} R_{cc} \Rightarrow R_{cc} = \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{cc}|$$

(II.5)

Et par la suite:

$$L_{cc}\omega = 10. \frac{1}{\omega\sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{II.6})$$

Avec: $\omega = 2\pi \cdot f$

f : est la fréquence du fondamental ($f = 50$ HZ) .

Les simulations montrent que pour obtenir une bonne THD et une meilleure dynamique, Z_f doit varier entre 4 et 8 fois Z_{cc}

$$Z_f = 4 Z_{cc} = R_f + jL_f\omega \quad (\text{II.7})$$

De (II.3), (II.5), (II.6) et (II.7) . On déduit les valeurs de R_f et L_f

$$R_f = 4 R_{cc} = 4 \frac{1}{\sqrt{101}} |Z_{cc}| \quad (\text{II.8})$$

$$L_f = 4 L_{cc} = 4.10 \frac{1}{\omega \sqrt{101}} |Z_{cc}|. \quad (\text{II.9})$$

La capacité du condensateur est donnée par :

$$C_f = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (\text{II.10})$$

Où:

I_h : l'amplitude du courant harmonique le plus faible à compenser .

ε : le taux d'ondulation de la tension V_{dc} , généralement égal à 5% .

ω_h : la pulsation de l'harmonique du rang le plus élevé à compenser .

La tension redressée par le redresseur constituée des diodes mises en antiparallèle avec les IG BTs est donnée par :

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}V_{eff}}{\pi} \quad (\text{II.11})$$

La tension de référence doit être légèrement supérieure à pou V_{dc} que le filtre puisse débiter sur le réseau.

Cours

Qualité de l'énergie électrique

Chapitre IV

Méthodes d'identification des courants harmoniques

IV.1 Introduction

L'identification des harmoniques est une étape très importante dans le processus de compensation active. En effet, le système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées. Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature [5].

Dans ce chapitre, nous ferons une étude détaillée de quatre méthodes d'identification que nous présentons leurs algorithmes de calcul.

IV.2 Les méthodes d'identification des courants harmoniques

Plusieurs méthodes permettant l'identification des composantes harmoniques du courant à partir du calcul des puissances harmoniques. D'autres méthodes basées sur la soustraction de la partie active du courant fondamental du courant total peuvent être utilisées dans le cas où l'objectif du filtre actif est la compensation à la fois de l'énergie réactive et des harmoniques. Dans notre mémoire, on va étudier quelques méthodes d'identification des courants harmoniques d'une charge polluante, et nous les comparons dans le but de valider l'efficacité de chacune d'elles.

IV.2.1 Méthode du filtre coupe-bande (notch filtre)

C'est le plus simple des algorithmes du calcul des courants de référence, comme l'illustre le diagramme représenté sur la figure. III.1 [11].

Dans ce type de commande le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande qui parfois est appelé filtre « notch » [29]. Ces filtres coupe-bande éliminent la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques. Ils ont, par conséquent, la même fréquence de coupure. Le courant de référence ainsi créé permet la génération des signaux de commande des semi-conducteurs de l'onduleur.

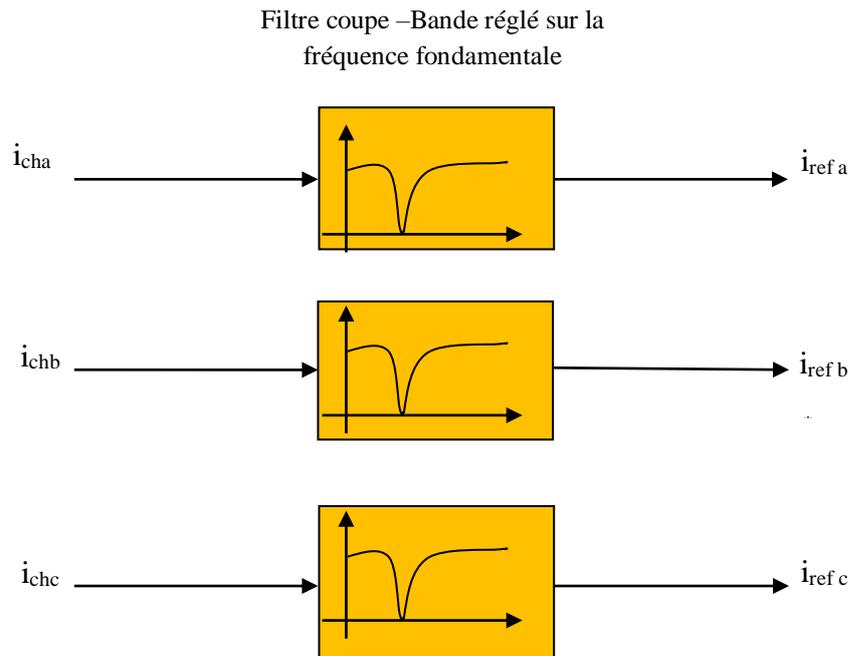


Figure. III.1 Méthode du filtre coupe-bande.

Cette méthode possède les quelques caractéristiques suivantes :

- ❖ Elle s'applique sans problème aux systèmes monophasé, biphasé ou triphasé,équilibré ou non.
- ❖ Possède un bon temps de réponse lors de régime transitoire.
- ❖ Le nombre d'harmoniques compensé dépend de la bande passante des semiconducteur composant l'onduleur du filtre actif.
- ❖ Méthode de calcul simple.

IV.2.2 Méthode de la puissance instantanée réelle et imaginaire (PIRI)

La méthode des puissances instantanées introduite par H. Akagi exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. La composante fondamentale est transformée en

une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si nous voulons que l'élimination de la composante continue soit facile à mettre en œuvre [12]. Son principe est énoncé comme suit :

Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [I_{ch}] = \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

La transformation $\alpha, \beta, 0$ triphasées permet d'écrire les relations suivantes:

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

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Les composantes avec l'indice (o) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

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

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.4})$$

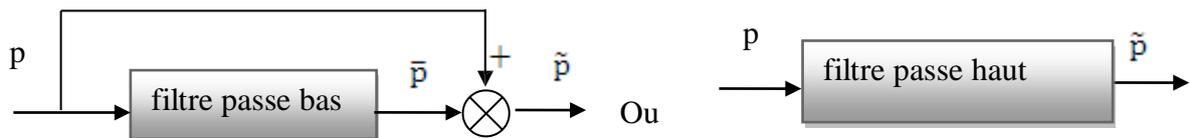
La puissance q ne représente pas la puissance instantanée conventionnelle (puissance réactive) dans le sens où elle est le résultat du produit d'une tension définie sur un axe en quadrature, contrairement à la puissance réactive qui ne considère que la fréquence fondamentale. La puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant de la tension. C'est pour cette raison que ce nouveau concept est appelé « puissance imaginaire instantanée ».

Les puissances p et q peuvent être décomposées selon :

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

Où dans le cas sinusoïdal : \bar{p} la partie continue liée à la composante fondamentale active du courant et \bar{q} la partie continue liée à la composante fondamentale réactive du courant. Alors que \tilde{p} et \tilde{q} sont les parties fluctuantes liées à la sommes des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Un filtre passe bas dans l'espace des puissances permet de séparer la composante fondamentale (autrement dit la partie continue), des composantes perturbatrices (la partie alternative). Deux filtres sont nécessaires, le premier pour isoler la partie \bar{p} de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie \bar{q} de la puissance réactive instantanée. Les deux filtres sont dimensionnés en tenant compte de la décomposition fréquentielle des puissances dans le repère diphasé



La fréquence d'accord de ce filtre (passe bas) doit être choisie en fonction de la performance dynamique attendue du filtre actif. Une bonne dynamique du filtre actif demande une fréquence d'accord élevée, alors que les bonnes performances aux rangs faibles nécessitent une fréquence de coupure faible. C'est ce qui nous a amené à faire un compromis entre la performance dynamique et la performance basses fréquences en choisissant la fréquence de coupure $\omega_0/2\pi$ de ce filtre à 25Hz et le coefficient d'amortissement ξ_c à 0.7. L'inverse de l'équation (III.4) de la puissance active et réactive permet d'établir la relation (III.5) des courants I_α et I_β :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant les puissances p et q par leurs parties continues et alternatives, on obtient

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}$$

(III.6)

Courant Actif Courant réactif Courants Harmoniques

Avec $\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2$ le calcul des courants perturbateurs dans le repère diphasé (α, β) est finalement donnée par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}$$

(III.7)

Grace à la Transformation de Concordia inverse, les parties alternatives des puissances permettent de déduire les courants perturbateurs triphasés. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix}$$

(III.8)

Le bloc fonctionnel ci-dessous, explique et résume d'une façon implicite le procédé de calcul des courants de référence par cette méthode.

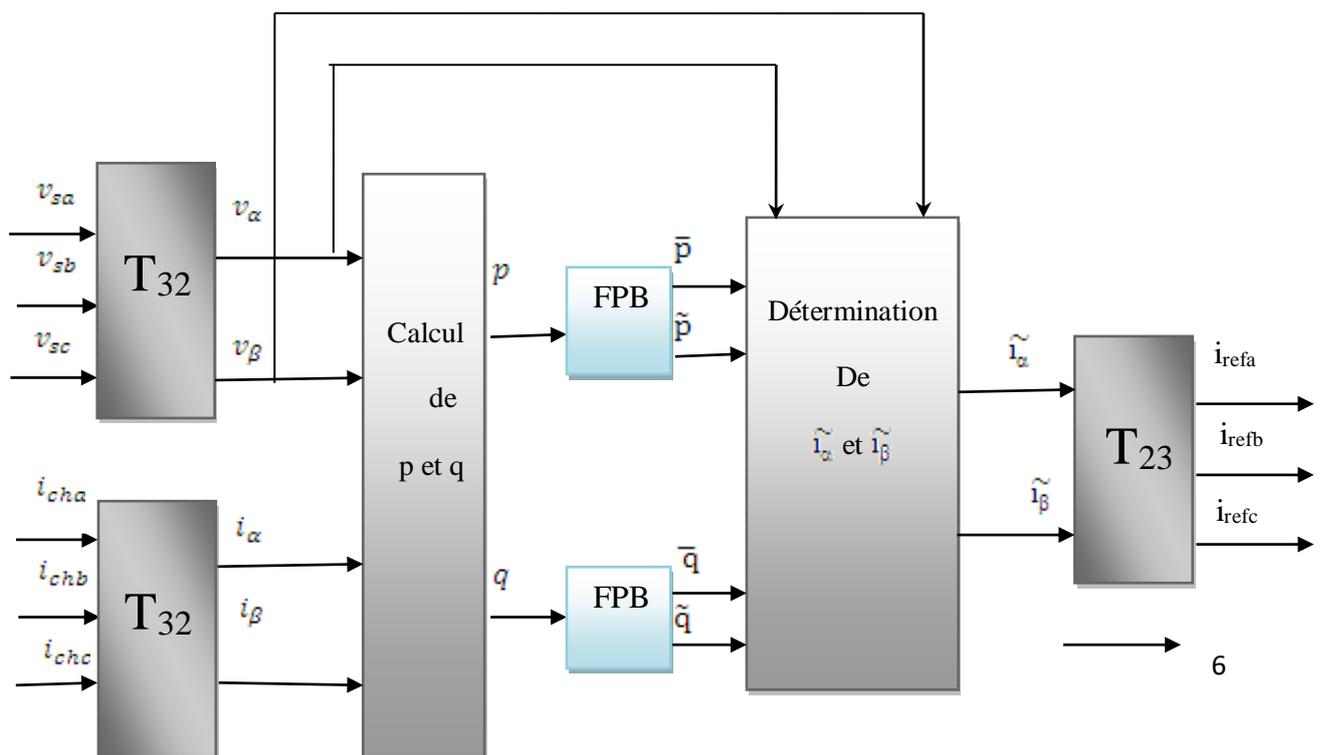


Figure III.2 Algorithme d'extraction des courants de références par PIRI

Cette méthode possède les caractéristiques suivantes :

- La méthode des PIRI classique utilise un filtre passe bas pour séparer les composantes des puissances active et réactive et a besoin d'un système d'extraction de la tension direct du réseau électrique.
- Elle n'est pas applicable pour les systèmes monophasés.
- La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), sinon la méthode des puissances instantanées PIRI n'est pas applicable puisque la tension du réseau est perturbée et/ou déformée, et afin de généraliser d'application de la méthode PIRI que nous avons adoptée à tout type de tension.

IV.2.3 Méthode du référentiel synchrone

Cette méthode introduite par Bhattacharya, exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de ligne $i_{cha}(t)$, $i_{chb}(t)$, $i_{chc}(t)$. Ensuite, une seconde transformation est opérée pour passer des courants de ligne en d-q, ce qui permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives [12]. Son principe est énoncé ci-après.

La transformation des coordonnées $a-b-c$ du courant en coordonnées $d-q$ et ce, à l'aide de la transformée de Park, en fixant la fréquence de celle-ci en synchronisme avec celle du réseau.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{cha} \\ i_{chb} \\ i_{chc} \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

L'élimination de la composante continue est réalisée par l'ajout d'un filtre passe-haut (FPH). L'obtention du courant de référence s'obtient en effectuant la transformée inverse de Park toujours en synchronisme avec la fréquence du réseau [13], ceci est conforté par la figure III.3.

$$\begin{bmatrix} i_{refa} \\ i_{refb} \\ i_{refc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & \cos\theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

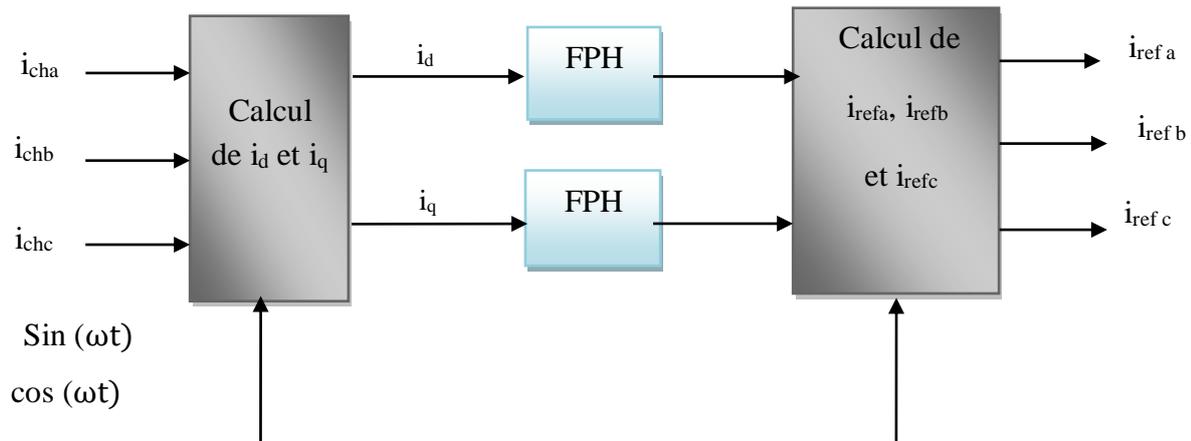


Figure III.3 Méthode du référentiel synchrone

IV.2.4 Méthode tri-monophasée

La méthode tri monophasé que nous avons développée, permet de traiter les trois phases de manière indépendante. Le principe est basé sur l'estimation de l'amplitude de la composante fondamentale active i_{chfa} de composante fondamentale réactive i_{chfr} du courant i_{cha} absorbé par la charge [09], [10] Elle est applicable aux systèmes monophasés et triphasés, pour les courants harmoniques générés par la charge.

Considérons le courant i_{cha} absorbé par la charge non-linéaire sur la première phase, il est exprimé par:

$$i_{cha}(\theta_s) = \sum_{n=1}^{\infty} (i_{ch} \sin(h.\theta_s - \Phi_1)) = i_{cha} \cdot \sin(\theta_s - \Phi_1) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{ch} \sin(h.\theta_s - \Phi_h) \quad (III.11)$$

Avec : $\theta_s = \omega t$

On rappelle que la composante fondamentale de la tension au point de raccordement du filtre actif sur la première phase, est définie par:

$$u_{sa}(t) = \sqrt{2} \cdot u_s \sin(\theta_s) \tag{III.12}$$

En multipliant équation (III.11) respectivement par $\sin(\theta_s)$ et $\cos(\theta_s)$ nous obtenons:

$$i_{cha}(\theta_s) \sin(\theta_s) = \frac{i_{cha}}{2} \cdot \cos(\Phi_s) - \frac{i_{cha}}{2} \cdot \cos(2\theta_s - \Phi_1) + \sin(\theta_s) \sum_{h=2}^{\infty} i_{ch} \sin(h \cdot \theta_s - \Phi_h) \tag{III.13}$$

$$i_{cha}(\theta_s) \cos(\theta_s) = -\frac{i_{cha}}{2} \cdot \sin(\Phi_s) + \frac{i_{cha}}{2} \cdot \sin(2\theta_s - \Phi_1) + \cos(\theta_s) \sum_{h=2}^{\infty} i_{ch} \sin(h \cdot \theta_s - \Phi_h) \tag{III.14}$$

D'après les relations (III.13) et (III.14) nous constatons que seules les composantes continues sont proportionnelles respectivement à l'amplitude du courant fondamentale actif et à l'amplitude du courant réactif. Les premières composantes alternatives ont une fréquence égale à deux fois la fréquence du réseau. Ces dernières seront donc filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas.

Après le filtrage, on obtient :

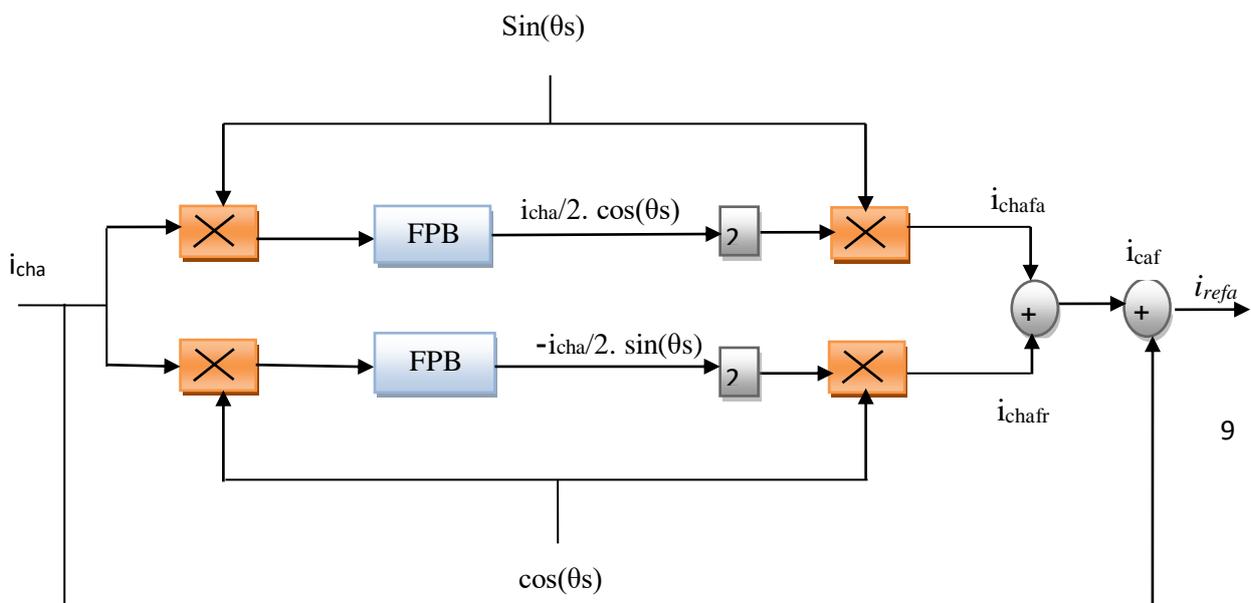
$$[i_{cha} \sin(\theta_s)]_{\text{filtre}} = \frac{i_{cha}}{2} \cos(\theta_s) \tag{III.15}$$

$$[i_{cha} \cos(\theta_s)]_{\text{filtre}} = -\frac{i_{cha}}{2} \sin(\theta_s) \tag{III.16}$$

On peut alors reconstituer le courant fondamental en multipliant respectivement les deux expressions précédentes par $2\sin(\theta_s)$ et $2\cos(\theta_s)$:

$$i_{chaf} = i_{cha} \cos(\Phi_1) \sin(\theta_s) - i_{cha} \sin(\Phi_1) \cos(\theta_s) = i_{chafa} + i_{cafr} = i_{cha} \sin(\theta_s - \Phi_1) \tag{III.17}$$

La figure ci-dessous illustre l'algorithme d'extraction du courant fondamental selon la méthode tri-monophasée.



IV.3 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les quatre méthodes d'identification pour l'extraction des courants harmoniques à partir de la connaissance de différentes composantes du courant absorbé par la charge non linéaire. Par conséquent, dans la suite de notre mémoire, nous présenterons les résultats de simulation d'un filtre actif parallèle avec ces différentes méthodes d'identification des courants harmoniques d'une charge polluante. à partir l'environnement Matlab.