

# Chapitre 4

## Solutions pour l'amélioration de la qualité de l'énergie

### Harmoniques

Trois orientations sont possibles pour les supprimer, ou au moins réduire leur influence :

- 1- Réduction des courants harmoniques générés
- 2- Modification de l'installation
- 3- Filtrage

#### 1- Réduction des courants harmoniques générés

##### 1-1 Placer des inductances dans l'installation

La mise en place d'une inductance en série avec l'alimentation permet de réduire les harmoniques du courant (en particulier ceux de rang élevés). L'inductance agit comme un filtre en offrant une plus grande impédance aux fréquences élevées limitant ainsi le passage des harmoniques et contribuant à atténuer leur impact sur le système électrique du circuit d'alimentation.

##### 1-2 Utilisation de redresseurs dodécaphasés

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de  $30^\circ$  entre elles, chacun de ces secondaires alimente un redresseur en pont de Graëtz qui réalise 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 chaque redresseur au primaire du transformateur. Le courant de ligne a une forme plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur.

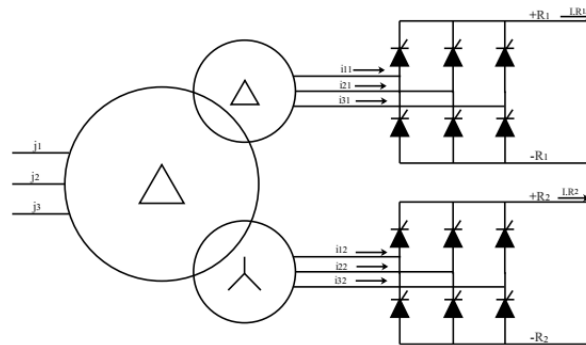


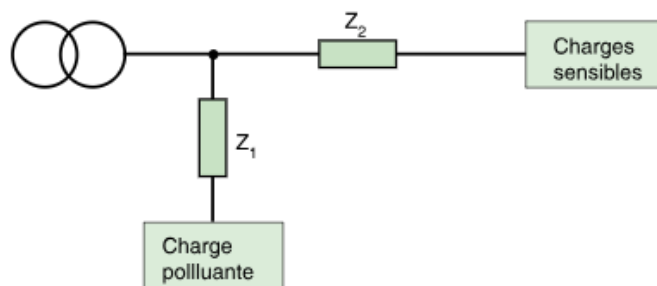
Fig 4.1 Transformateur-redresseur dodécaphasé (Douze phases)

#### 2-Modification de l'installation

La stratégie de modification consiste à modifier les caractéristiques des charges ou des sources, afin de réduire la génération des harmoniques et leur propagation dans le réseau.

##### 2-1 Positionner les charges polluantes en amont du réseau

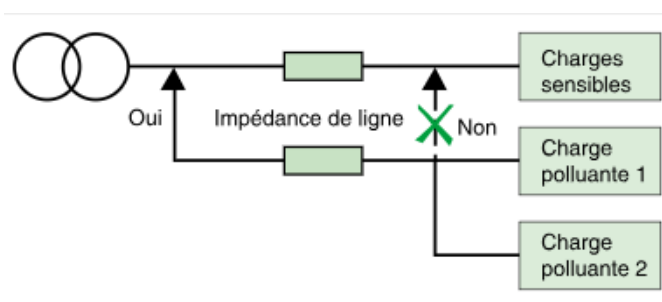
Il est préférable de connecter les charges polluantes le plus en amont possible pour limiter la propagation des perturbations dans tout le réseau, préservant ainsi la qualité de l'énergie pour les autres utilisateurs.



**Fig. 4.2** Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires (schéma conseillé)

## 2-2 Regroupement des charges polluantes

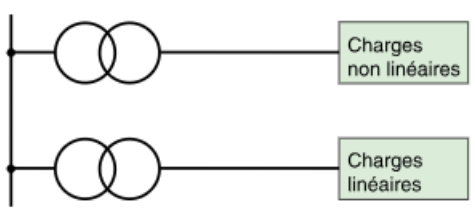
Pour établir un schéma unifilaire, il convient de séparer les équipements perturbateurs des autres. En pratique, alimenter les charges polluantes et non polluantes par des jeux de barres différents.



**Fig. 4.3** Regroupement des charges non-linéaires et alimentation le plus en amont possible

## 2-3 Séparation des sources

Dans la lutte contre les harmoniques, une amélioration supplémentaire est obtenue en réalisant une alimentation par transformateur séparé. L'inconvénient de cette solution est l'augmentation du coût de l'installation.

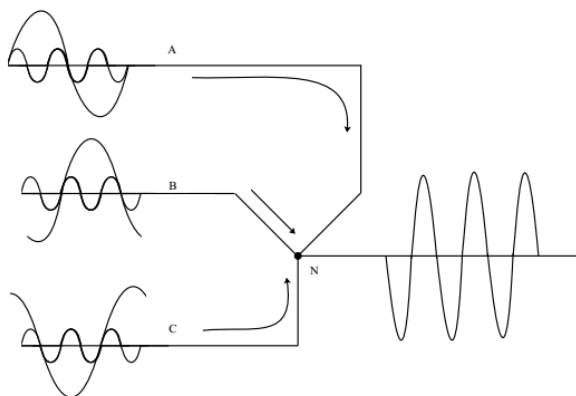


**Fig. 4.4** Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé

## 2-4 Redimensionnement du neutre

Quand un système d'alimentation triphasé est déséquilibré, les harmoniques multiples de trois sont inclus dans la composante homopolaire ce qui cause un sur-échauffement du neutre. La surcharge du conducteur du neutre est considérée comme le problème le plus fréquent dans les installations industrielles. La somme des courants des trois phases sort à travers le conducteur du neutre. Il est bon que chaque phase

ait son propre conducteur de neutre ou qu'un fil de neutre partagé possède au moins deux fois la section courante de chaque fil de phase.



**Fig 4.5** Conducteurs de neutres surchargés.

### 3-Filtrage

#### 3-1 Le filtrage passif

##### 3-1-1 Principe de Fonctionnement :

Il consiste à réaliser une impédance faible aux fréquences à atténuer grâce à l'agencement de composants passifs (Inductance, Condensateur, Résistance) afin de constituer un ou des pièges aux harmoniques dont on veut éviter la propagation, pour que le courant coté source reste le plus proche possible de la forme sinusoïdale. Cet ensemble est placé en dérivation sur le réseau. Plusieurs filtres passifs en parallèle peuvent être nécessaires pour filtrer plusieurs composantes.

Le dimensionnement des filtres harmoniques doit être soigné : un filtre passif mal conçu peut conduire à des résonances dont l'effet est d'amplifier des fréquences qui n'étaient pas gênantes avant son installation

| Principe  | Caractéristiques  |
|---|---|
| <p>Dérivation par un filtre passif accordé sur chaque fréquence harmonique à éliminer</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pas de limites en courant harmonique</li> <li>• Compensation d'énergie réactive assurée.</li> <li>• Elimination d'un ou plusieurs rangs harmoniques (habituellement : 5, 7, 11). Un filtre pour un ou deux rangs à compenser.</li> </ul> <p><b>Avantages</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Économique : faible coût du composant mis en œuvre.</li> <li>• Pas de surveillance à assurer en cours de fonctionnement</li> </ul> <p><b>Inconvénients</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensibilité aux variations de l'impédance du réseau électrique et la dépollution harmonique n'est efficace que pour l'installation présente (Ajout ou suppression de charges peut rendre la solution inopérante).</li> <li>• Risque d'amplification des harmoniques en cas de modification du réseau.</li> <li>• Mise en œuvre souvent difficile à réaliser dans les installations existantes</li> </ul> |

### 3-1-2 Calcul des filtres passifs

Le calcul d'un filtre passif consiste à dimensionner ses éléments RLC. Les paramètres pris en compte dans ce calcul sont souvent :

1. La tension nominale  $V$  (fondamentale) de fonctionnement, c'est-à-dire, la tension au jeu de barre où le filtre est connecté.
2. La puissance réactive  $Q_F$  que ce filtre est appelés à compenser.
3. Le(s) rang(s) d'harmonique(s)  $h_n$  auquel(s) ce filtre est accordé.
4. Le facteur de qualité  $Q$  du filtre. qui détermine la netteté du réglage du filtre passif, est calculé par :

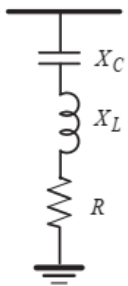
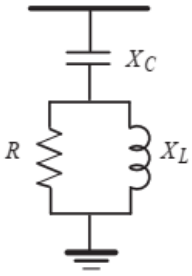
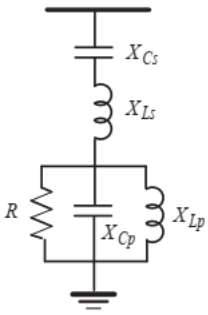
$$Q = \frac{X_n}{R}$$

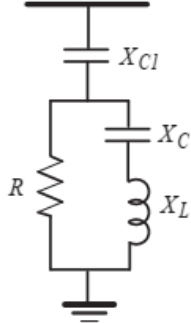
$X_n$ : Réactance caractéristique du filtre

$R$ : valeur de la résistance dans le circuit

Le facteur de qualité est compris entre 30 et 100.

### 3-1-2 Configurations possibles de filtres passifs

| Type                      | Schéma  |  |
|---------------------------|---|--|
| Filtre résonant           |  | Accordé à une fréquence spécifique, et donc capable de piéger (éliminer) un seul harmonique.   |
| Filtre passe haut         |  | Accordé à une fréquence à partir de laquelle il doit piéger tous les harmoniques supérieurs, donc capables d'éliminer plusieurs harmoniques. |
| Filtre à double résonance |  | Accordé à deux fréquences distinctes pour pouvoir éliminer deux harmoniques.   |

|               |   |   |
|---------------|---|---|
| Filtre type C |  | C'est un filtre passe haut également mais avec des caractéristiques meilleures (compensation de la puissance réactive, et moins de pertes). |
|---------------|---|---|

### 3-1-3 Phénomène de résonance

Le fonctionnement des filtres passifs (L-C) comprenant des inductances, des condensateurs et parfois des résistances repose sur le « phénomène de résonance » qui se produit en raison des variations de fréquence des inducteurs et des condensateurs.

La réactance  $X_L$  d'une inductance  $L$  est d'autant plus grande que la fréquence  $f$  est élevée :

$$X_L = L \times \omega = L \times 2 \times \pi \times f$$

La réactance  $X_C$  d'un condensateur  $C$  est d'autant plus petite que la fréquence est élevée :

$$X_C = \frac{1}{C \times \omega} = \frac{1}{C \times 2 \times \pi \times f}$$

Lorsque ce filtre résonne face à un harmonique de rang  $h_n$ , les réactances, inductive ( $X_{Ln}$ ) et capacitive ( $X_{Cn}$ ) correspondantes sont égales, et donc, la résistance, qui est généralement faible, est la seule impédance dans le circuit. On tire alors les relations :

$$X_{Ln} = h_n X_L = X_{Cn} = X_C / h_n = X_n$$

On déduit alors la réactance caractéristique du filtre  $X_n$  comme :

$$X_n = X_{Ln} = X_{Cn} = \sqrt{X_L X_C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

La résonance de ce filtre aura lieu au rang  $h_n$  :

$$h_n = f_n / f_1 = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{X_C / X_L} = \sqrt{\frac{SCC}{QC}}$$

$h_n$  : Rang de l'harmonique

$f_1$  : Fréquence fondamentale (50 Hz par exemple)

Responsable du module : MAYOUF

$f_n$  : Fréquence de résonance du filtre au rang  $h_n$

$\omega_1$  : Pulsation de la fréquence fondamentale ( $\omega_1 = 2\pi f_1$ )

$Q_C$  : Capacité du condensateur

SCC : La puissance de court-circuit du jeu de barres

Cette résonance aura donc lieu au rang  $h_n$ , si la réactance inductive est choisie comme :

$$X_L = X_C / h_n^2$$

Le phénomène de résonance donne naissance à des valeurs extrêmes de tension et de courant. Selon la nature du schéma (résonance parallèle ou résonance série), les surintensités et les surtensions qui en résultent peuvent occasionner de graves dommages sur l'installation (destruction de condensateurs par exemple).

### 3-1-4 La résonance série :

L'expression simplifiée de l'impédance globale, obtenue à partir des éléments

$L$  et  $C$  en série, s'exprime par la relation suivante :

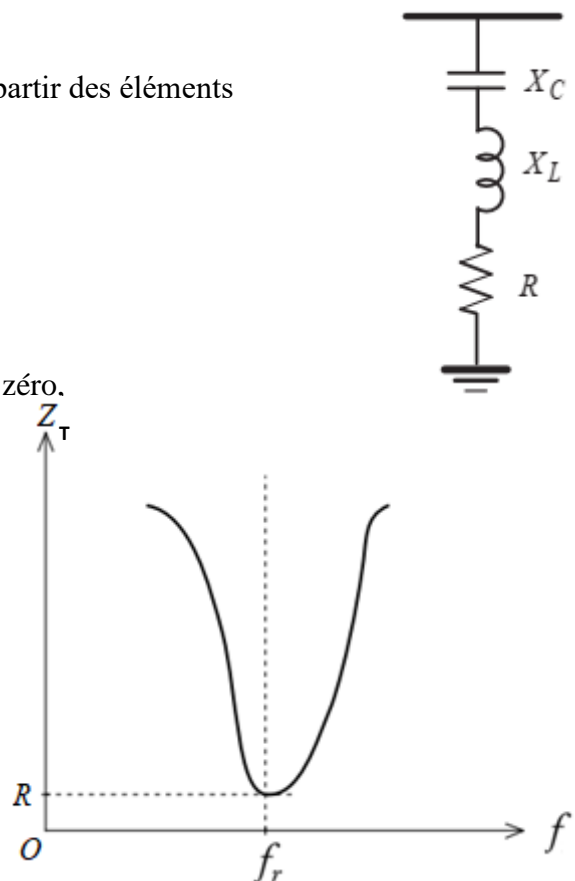
$$Z = \frac{L \times C \times \omega_r^2 - 1}{C \omega}$$

À la résonance, le numérateur  $L \times C \times \omega_r^2 - 1$  est égal à zéro.

$$1 - L \times C \times \omega_r^2 = 0$$

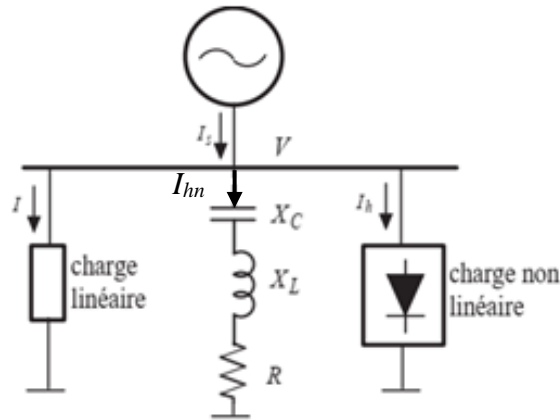
L'impédance totale  $Z_T$  tend vers une valeur minimale comme illustre la figure ci-contre (Impedance scan).

Pour cette fréquence particulière  $f_r$ , le courant est uniquement limité par la faible résistance du circuit, celle-ci étant généralement faible, la valeur du courant sera donc **élevée**.



## Calcul du filtre série résonnant

Le calcul d'un tel filtre pour une résonance à une fréquence donnée suit les étapes suivantes :



1. Calcul de la réactance capacitive : A partir de la puissance réactive nécessaire requise  $Q_C$  par la source d'harmonique, la réactance capacitive du filtre est déduite comme :

$$X_C = V^2 / Q_C$$

2. Calcul de la réactance inductive : Pour piéger l'harmonique de rang  $h_n$ , la réactance inductive du filtre est :

$$X_L = X_C / h_n^2$$

3. Calcul de la Résistance : La résistance du filtre est déduite à partir du facteur de qualité  $Q$  du filtre par :

$$R = X_n / Q$$

La capacité (Var) du filtre peut être alors déduite par :

$$Q_F = \frac{V^2}{X_C - X_L}$$

Puisque  $X_L = X_C / h_n^2$  ,  $Q_F = \frac{h_n^2}{h_n^2 - 1} Q_C$

L'impédance du filtre résonant est donnée à chaque fréquence - de rang  $h$  - par :

$$Z_F(h) = R + j\left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right) = R + j\frac{X_C}{h_n^2}\left(\frac{h^2 - h_n^2}{h}\right)$$

Le module de  $Z_F$  est :

$$|Z_F(h)| = \sqrt{R^2 + \left(hX_L - \frac{X_C}{h}\right)^2}$$

En négligeant la résistance  $R$  ( $R \approx 0$ ), La tension aux borne du condensateur est donnée par :

$$\frac{V_{C1}}{V_1} = \frac{-jX_C}{R + j(X_L - X_C)} \approx \frac{h_n^2}{h_n^2 - 1}$$

$V_1$  : La tension du jeu de barres à la fréquence fondamentale.

$$\frac{V_{C1}}{V_{bus1}} = \frac{-jX_{C1}}{j(X_{L1} - X_{C1})} = \frac{X_{C1}/X_{L1}}{X_{C1}/X_{L1} - 1} = \frac{h_n^2}{h_n^2 - 1}$$

A la fréquence de résonance cette tension devient alors :

$$\frac{V_{Cn}}{V_n} = \frac{-jX_{Cn}}{R + j(X_{Ln} - X_{Cn})} = \frac{-jX_n}{R} = -jQ$$

$$\frac{V_{Cn}}{V_{busn}} = \frac{-jX_{Cn}}{R + j(X_{Ln} - X_{Cn})} = -j\frac{X_n}{R} = -jQ$$

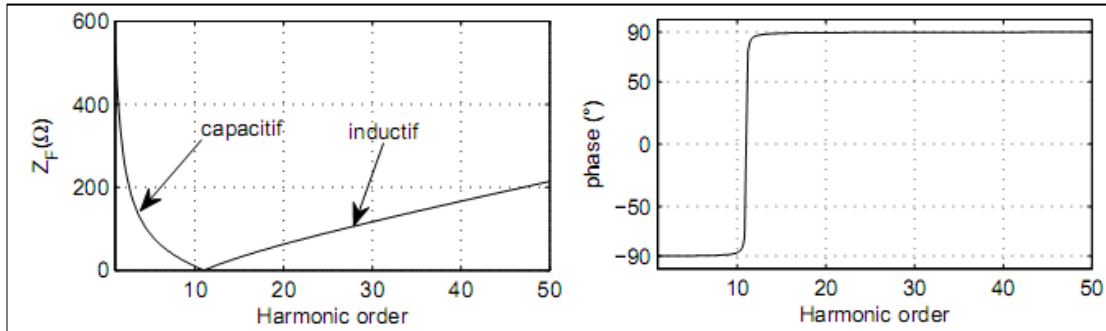
Avec ;

|            |   |
|------------|---|
| $V_{C1}$   | La tension de la composante fondamentale aux bornes du condensateur |
| $V_{bus1}$ | La tension de la composante fondamentale du jeu de barres           |
| $V_{Cn}$   | La tension aux bornes du condensateur à la fréquence de résonance   |
| $V_{busn}$ | La tension du jeu de barres à la fréquence de résonance             |
| $X_n$      | La réactance caractéristique du filtre                              |
| $Q$        | Le facteur de qualité du filtre                                     |



**Exemple :** Filtre accordé au 11<sup>ème</sup> harmonique, avec  $Q_C = 2 \text{ Mvar}$ ,  $V = 33 \text{ kV}$ ,  $Q = 60$

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} = 544,5 \Omega, \quad X_L = \frac{X_C}{h_n^2} = 4,5 \Omega, \quad R = \frac{\sqrt{X_C X_L}}{Q} = 0,825 \Omega \quad Z_F(h) = 0,825 + j \left( 4,5h - \frac{544,5}{h} \right)$$



### 3-1-5 La résonance parallèle :

#### a) Circuit LC

L'expression simplifiée de l'impédance globale, obtenue à partir des éléments

$L$  et  $C$  en série, s'exprime par la relation suivante :

$$Z = \frac{L \times \omega_r}{1 - L \times C \omega_r^2}$$

À la résonance, le numérateur est égal zéro :

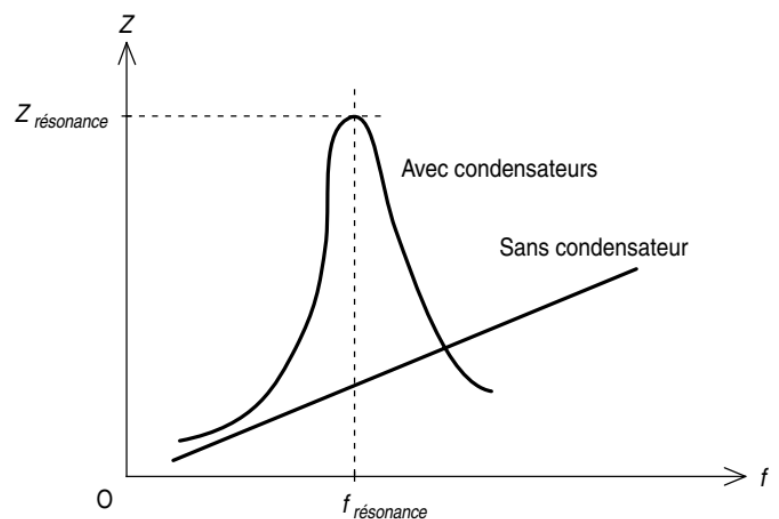
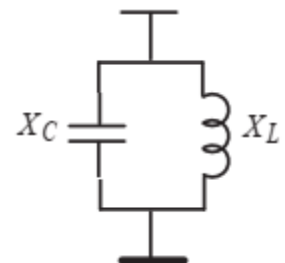
$$1 - L \times C \omega_r^2 = 0$$

L'impédance  $Z$  tend vers une valeur infinie (Très grande valeur en pratique), comme illustre la figure ci-contre.

La fréquence de résonance  $f_r$  conduit à des surtensions harmoniques importantes :

$$V_h = Z_h \times I_h$$

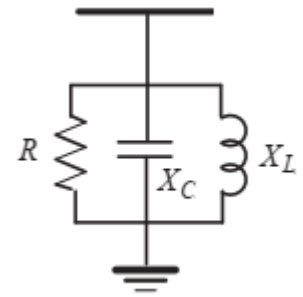
Ces tensions présentes contribuent à la déformation de l'onde de tension sinusoïdale (augmentation du taux de distorsion harmonique en tension) et peuvent nuire au fonctionnement des équipements électriques.



**b) Circuit RLC**

L'impédance équivalente du filtre :

$$Z = \frac{-j \frac{RX_L X_C}{X_L - X_C}}{R - j \frac{X_L X_C}{X_L - X_C}} = \frac{-jRX_L X_C}{R(X_L - X_C) - jX_L X_C}$$



Pour un harmonique quelconque  $h$  :

$$\begin{cases} X_L(h) = hX_L \\ X_C(h) = \frac{X_C}{h} \end{cases} \longrightarrow X_L(h)X_C(h) = X_L X_C$$

L'impédance à l'harmonique  $h$  est donc :

$$Z(h) = \frac{-jRX_L X_C}{R \left( hX_L - \frac{X_C}{h} \right) - jX_L X_C}$$

$$|Z(h)| = \frac{RX_L X_C}{\sqrt{\left[ R \left( hX_L - \frac{X_C}{h} \right) \right]^2 + [X_L X_C]^2}}$$

A l'harmonique de résonance  $h = h_r$  :  $h_r X_L = \frac{X_C}{h_r} = X_n$

Ce qui implique que :

$$\begin{cases} h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \\ X_n = \sqrt{X_L X_C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \end{cases}$$

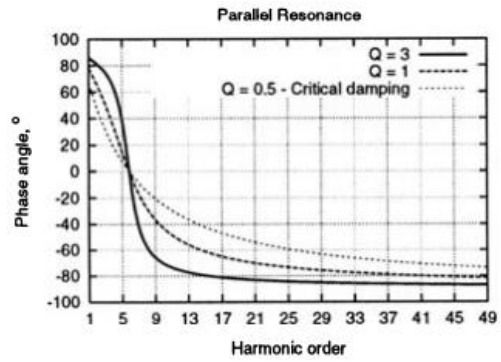
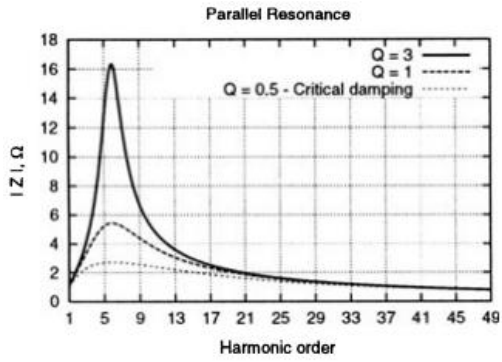
A la résonance, l'impédance équivalente du filtre est donc purement résistive et égale  $R$  :  $Z(h_r) = R$

Le facteur de qualité :

$$Q = \frac{R}{X_n}$$

**Exemple** de réponse d'un filtre RLC parallèle avec :  $X_C = 60 \Omega$      $X_L = 0.495 \Omega$ .

Pour différentes valeurs du facteur de qualité  $Q$  : 0.5 - 1 - 3

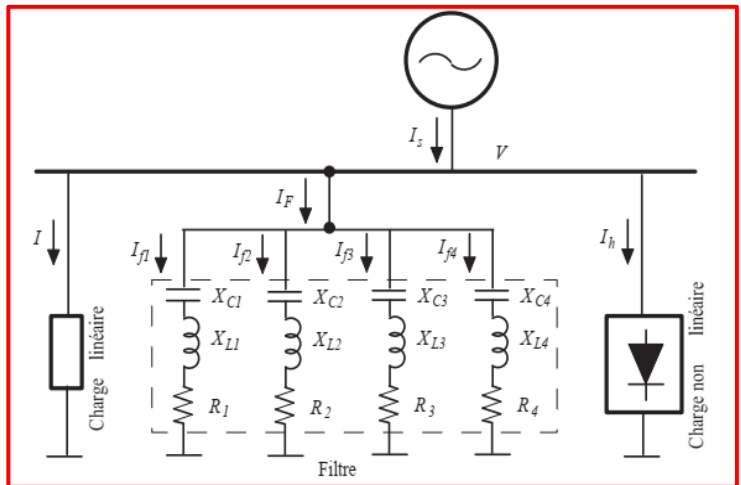


**Association de filtres passifs résonants :**

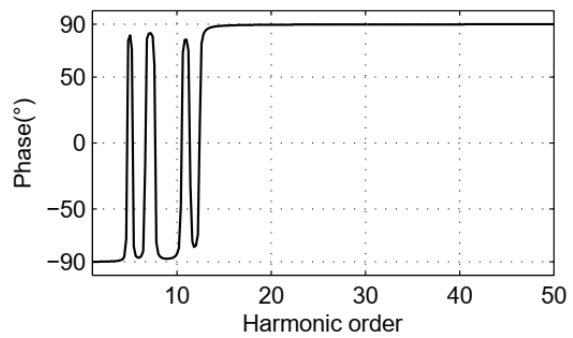
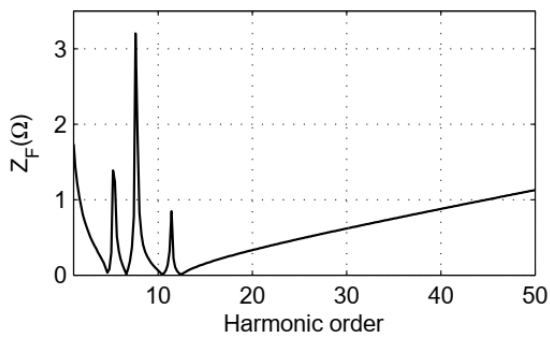
Le filtre résonant simple ne peut être utilisé seul. En pratique, soit plusieurs sont utilisés afin d'éliminer plusieurs harmoniques soit il est utilisé avec des filtres passe haut.

**Exemple :**

|                    | Filtre 1 | Filtre 2 | Filtre 3 | Filtre 4 |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|
| $X_C$ ( $\Omega$ ) | 5.33     | 8        | 8        | 8        |
| $X_L$ ( $\Omega$ ) | 0.2447   | 0.1831   | 0.0732   | 0.0521   |
| $R$ ( $m\Omega$ )  | 11.42    | 12.10    | 07.65    | 06.46    |

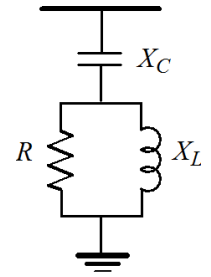


**Réponse fréquentielle du banc de filtres :**



### 3-1-6 Filtre passif passe haut

Ce filtre de second degré est accordé à une fréquence à partir de laquelle il doit piéger tous les harmoniques supérieurs (généralement au-delà du 17<sup>ème</sup>) en leur opposant une impédance faible.



Connaissant la puissance  $Q_C$  :  $X_C = \frac{V^2}{Q_C}$

Connaissant le rang de résonance  $h_n$  :  $X_L = \frac{X_C}{h_n^2} = \frac{V^2}{Q_C h_n^2}$

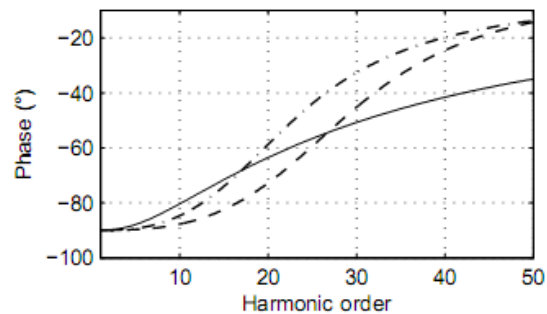
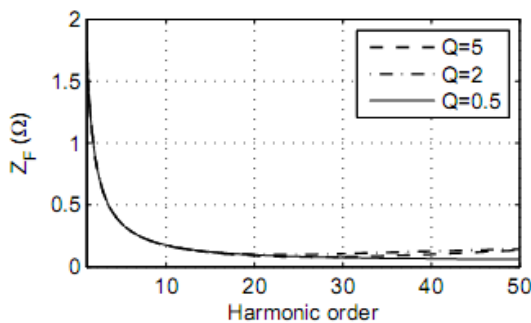
La résistance du filtre R, calculée à partir du facteur de qualité  $Q$  et de la réactance caractéristique du filtre  $X_n$   $R = X_n Q = \sqrt{X_C X_L} Q$   $0,5 < Q < 5$

La capacité (Var) du filtre :  $Q_F = \frac{V^2}{X_C - X_L} = \frac{h_n^2}{h_n^2 - 1} Q_C$

Son impédance en fonction de la fréquence :  $\bar{Z}_F(h) = \frac{R(hX_L)^2}{R^2 + (hX_L)^2} + j \left( \frac{R^2(hX_L)}{R^2 + (hX_L)^2} - \frac{X_C}{h} \right)$

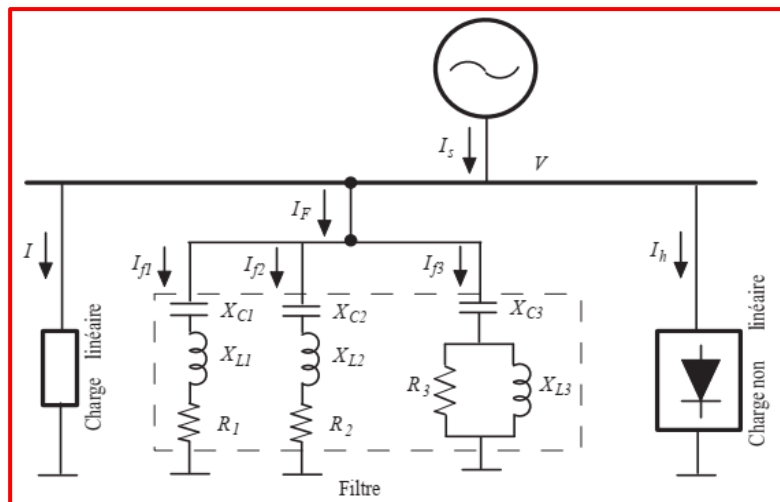
**Exemple :** Filtre passe haut accordé au 17<sup>ème</sup> harmonique, avec :

$$X_C = 1.734 \Omega, X_L = 0.006 \Omega, Q=0.5, 2, 5$$

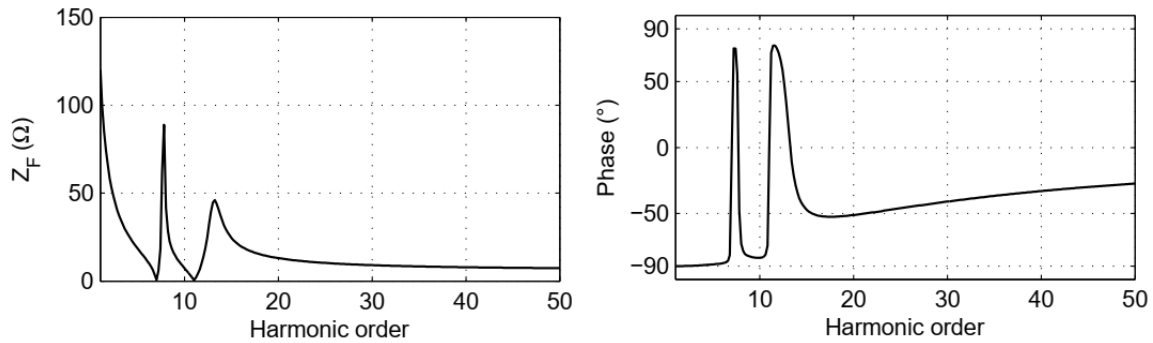


**Exemple :** Banc de filtre passe haut et filtres résonants

|                    | Filtre 1 | Filtre 2 | Filtre 3 |
|--------------------|----------|----------|----------|
| $X_C$ ( $\Omega$ ) | 544.5    | 544.5    | 217.8    |
| $X_L$ ( $\Omega$ ) | 11.1122  | 4.5      | 0.7536   |
| $R$ ( $\Omega$ )   | 0.7778   | 0.4950   | 64.058   |



Réponse fréquentielle du banc de filtres :

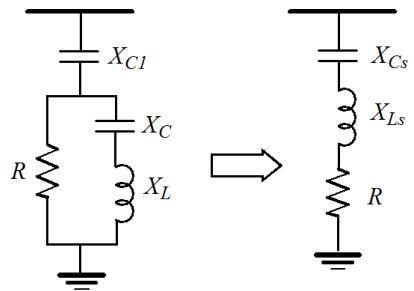


### 3-1-7 Filtre de type C

Filtre de 2<sup>nd</sup> ordre, capable d'éliminer les harmoniques avec moins de pertes.

Le filtre résonant ( $X_C$ ,  $X_L$ ) est calculé pour une résonance à la fréquence fondamentale

Une méthode simple pour calculer un filtre C, consiste à :



1. Poser un modèle équivalent série
  2. Dans le modèle série la capacité  $C_s$  est équivalente aux deux capacités en série
  3. Dans le filtre de type C, la réactance  $X_L$  est supposée égale à celle du modèle série  $X_{Ls}$
- Comme dans un filtre résonant, la puissance réactive du filtre est fournie à la fréquence fondamentale par  $C_1$ , d'où :

$$X_{C1} = \frac{V^2}{Q_{C1}} \Rightarrow C_1 = \frac{Q_{C1}}{\omega_1 V^2}$$

- La fréquence de résonance du filtre C est déduite à partir du modèle équivalent série :

$$h_n = \frac{1}{\omega_1 \sqrt{L_s C_s}}$$

- À partir des suppositions ci-dessus :

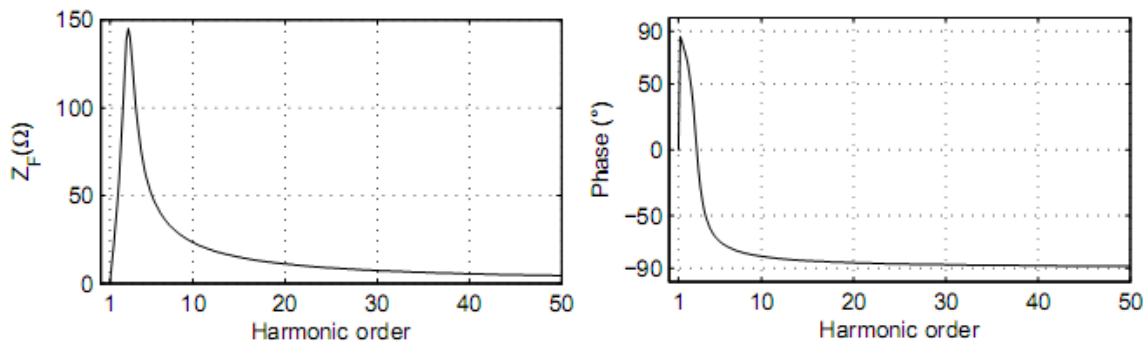
$$\left. \begin{array}{l} C_s = \frac{C_1 \times C}{C_1 + C} \\ L_s = L = \frac{1}{\omega_1^2 C} \end{array} \right\} \text{Remplaçant dans l'expression de } h_n \rightarrow C = C_1(h_n^2 - 1) \rightarrow L = \frac{1}{\omega_1^2 C_1(h_n^2 - 1)}$$

- Les réactances, la résistance du filtre C sont alors :

$$X_{C1} = \frac{V^2}{Q_{C1}} \quad X_C = X_L = \frac{V^2}{Q_{C1}(h_n^2 - 1)} \quad R = QX_n = Q \frac{X_{C1}}{h_n} = \frac{QV^2}{h_n Q_{C1}}$$

- Finalement, son impédance est : 
$$Z_F(h) = \frac{R \left[ j \left( hX_L - \frac{X_C}{h} \right) \right]}{R + j \left( hX_L - \frac{X_C}{h} \right)} - j \frac{X_{C1}}{h}$$

**Exemple :** Filtre 33 kV accordé au 3<sup>ème</sup> harmonique, avec  $Q_C = 5$  MVar,  $Q=2$



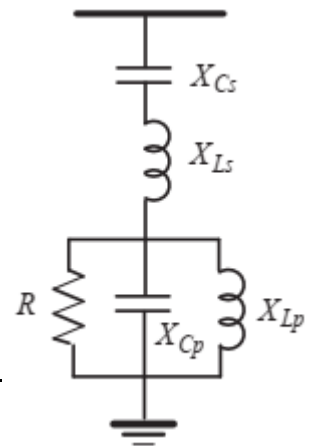
### 3-1-8 Filtre à double résonance :

Un filtre à double résonance est une combinaison de filtre résonant série ( $L_s, C_s$ ) et de filtre résonnant parallèle ( $C_p, L_p$ ).

L'impédance de ce filtre en fonction de la fréquence est donnée par :

$$Z_F(h) = Z_{FS}(h) + Z_{FP}(h)$$

$$Z_{FS}(h) = j \left( hX_{Ls} - \frac{X_{Cs}}{h} \right) \quad Z_{FP}(h) = \frac{RX_{Lp}X_{Cp}}{X_{Lp}X_{Cp} + jR(hX_{Lp} - X_{Cp}/h)}$$



$$|Z_F(h)| = 0 \Rightarrow h^4 \omega_1^2 L_s L_p C_s C_p - h^2 \omega_1^2 (L_s C_s + L_p C_p + L_p C_s) + 1 = 0 \dots \dots \dots (1)$$

Ce qui donne après un certain développement la relation entre les deux solutions  $h_{n1}$  et  $h_{n2}$

$$h_{n1} h_{n2} = h_s h_p = \frac{1}{\omega_1^2} \frac{1}{\sqrt{L_s C_s L_p C_p}}$$

$h_s$  et  $h_p$  : Les rangs de fréquences de résonance des parties série et parallèle du filtre.

Tenant compte des rangs ( $h_s$  et  $h_p$ ), l'équation (1) peut réécrite comme :

$$\left(\frac{1}{h_s^2 h_p^2}\right) h^4 - \left(\frac{C_s}{h_p^2 C_p} + \frac{1}{h_s^2} + \frac{1}{h_p^2}\right) h^2 + 1 = 0$$

Si le filtre est accordé à des fréquences  $h_{n1}$  et  $h_{n2}$ , alors la relation entre  $C_s$  et  $C_p$  peut être déduite comme :

$$\frac{C_s}{C_p} = \frac{h_{n1}^2 + h_{n2}^2 - h_p^2}{h_s^2} - 1$$

D'où

$$C_p = \frac{h_s^2}{h_{n1}^2 + h_{n2}^2 - h_p^2 - h_s^2} C_s \Rightarrow X_{Cp} = \frac{h_{n1}^2 + h_{n2}^2 - h_p^2 - h_s^2}{h_s^2} X_{Cs} \dots\dots\dots (2)$$

Compte tenu du fait  $\omega_s = h_s \omega_1$  et  $\omega_p = h_p \omega_1$ , on déduit que :

$$L_s = \frac{1}{h_s^2 \omega_1^2 C_s} \Rightarrow X_{Ls} = \frac{X_{Cs}}{h_s^2} \dots\dots\dots (3)$$

$$L_p = \frac{1}{h_p^2 \omega_1^2 C_p} \Rightarrow X_{Lp} = \frac{X_{Cp}}{h_p^2} \dots\dots\dots (4)$$

La réactance capacitive  $X_{Cs}$  peut être déterminée à partir de la puissance réactive du filtre à la fréquence fondamentale :

$$Q_F = -j \frac{V^2}{Z_F(1)}$$

$Z_F(1)$  : Représente l'impédance du filtre à la fréquence fondamentale qui est exprimée, en supposant la résistance R infinie, comme suit :

$$Z_F(1) = j \left( X_{Ls} - X_{Cs} - \frac{X_{Lp} X_{Cp}}{X_{Lp} - X_{Cp}} \right)$$

La capacité  $C_s$  et sa réactance peut être déduite comme suit :

$$C_s = \frac{1}{\omega_1 V^2} \left[ \left( \frac{h_p}{h_{n1} h_{n2}} \right)^2 + \frac{(h_{n1}^2 + h_{n2}^2 - h_p^2) h_p^2 - (h_{n1} h_{n2})^2}{(h_{n1} h_{n2})^2 (h_p^2 - 1)} \right] Q_F$$

$$X_{C_s} = \frac{V^2}{Q_F} \left[ \left( \frac{h_p}{h_{n1} h_{n2}} \right)^2 + \frac{(h_{n1}^2 + h_{n2}^2 - h_p^2) h_p^2 - (h_{n1} h_{n2})^2}{(h_{n1} h_{n2})^2 (h_p^2 - 1)} \right]^{-1} \dots\dots\dots (5)$$

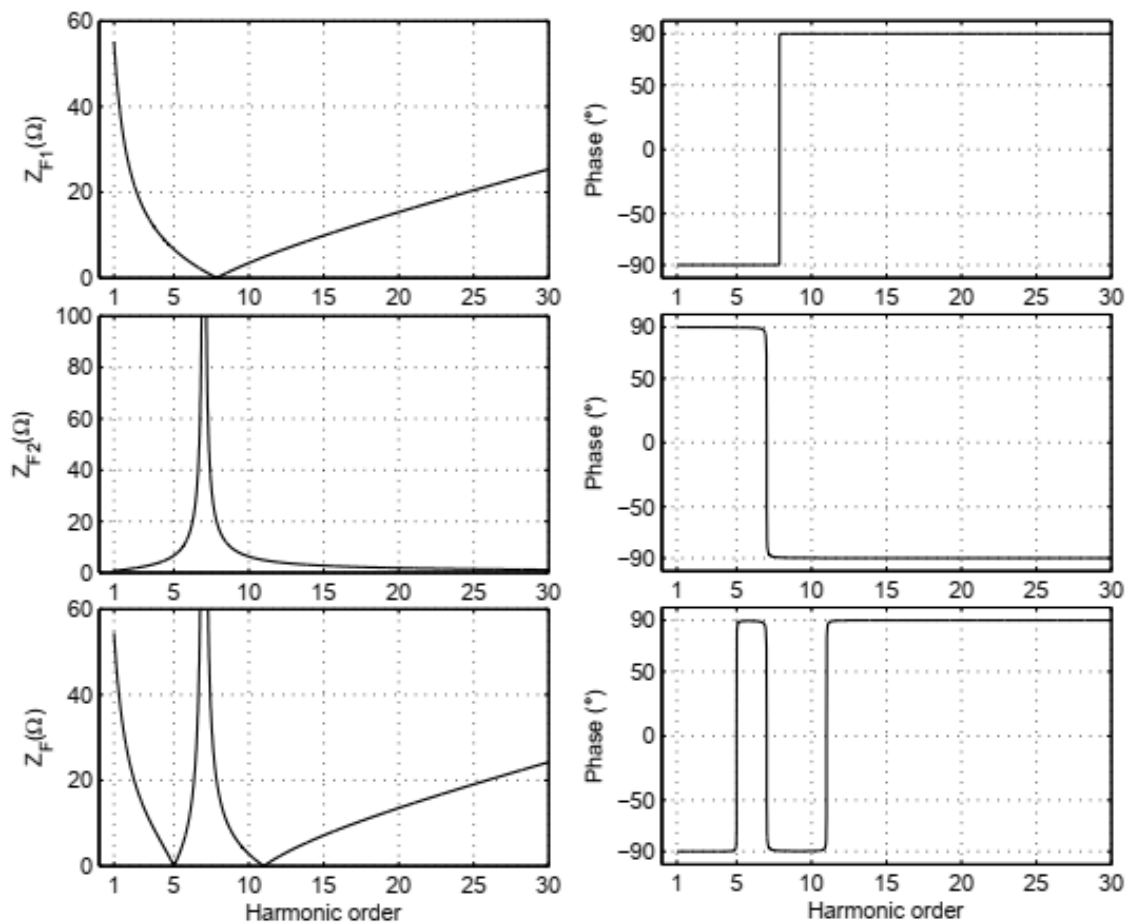
**Calcul du filtre à double résonance**

**Les données :**  $Q_F$ ,  $V$ ,  $\omega_p$ ,  $\omega_{h1}$  et  $\omega_{h2}$

**Etapas de calcul :**

- 1- Calculer la capacité  $X_{C_s}$  à partir de l'équation (5).
- 2- Dédire la réactance  $X_{C_p}$  à partir de la relation (2).
- 3- Dédire finalement à partir des équations (3) et (4) les réactances inductives  $X_{L_s}$  et  $X_{L_p}$

Exemple de réponse fréquentielle d'un filtre double résonance





## 3-2 Filtrage Actif

### Introduction :

Les inconvénients des filtres passifs (non adaptation aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (FAP).

### Principe de Fonctionnement :

Les filtres actifs sont des onduleurs mono/triphasés agissant comme source de courant ou de tension en injectant en série ou en parallèle sur le réseau électrique des composantes harmoniques en opposition de phase à ceux générées par la charge polluante, par conséquent, les composantes harmoniques de la charge s'éliminent et le courant de la source va acquérir une forme quasi sinusoïdale.

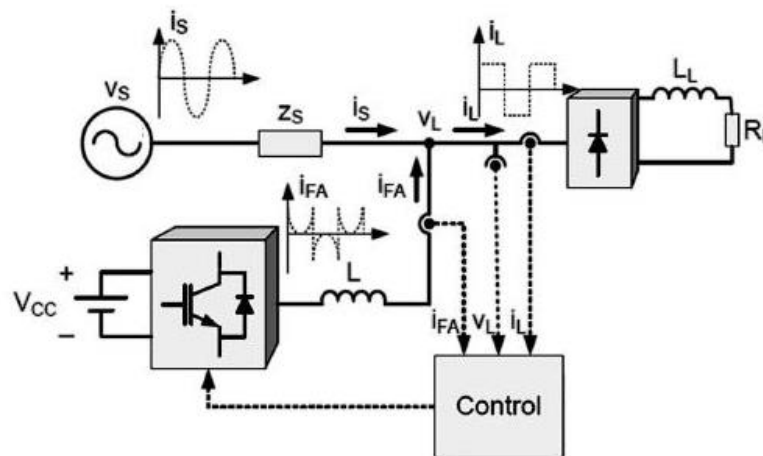


Figure 4.7. Diagramme de base d'un filtre actif parallèle

Un filtre actif est constitué de deux parties principales :

- Une partie puissance : Souvent un onduleur de tension connecté au point de couplage commun (PCC) avec un bus continu capacitif,
- Une partie commande : qui consiste à calculer en temps réel le courant harmonique de la charge non linéaire et de forcer l'onduleur à l'injecter en opposition de phase au réseau afin que la somme  $i_F + i_L$  soit toujours sinusoïdale.

$$i_L = i_1 + i_h \quad i_F = -i_h \quad \Rightarrow i_s = i_L + i_F = i_1$$

$i_1$  : Composante fondamentale du courant de charge

### Avantages de ces filtres actifs :

- Le volume physique du filtre est plus réduit.
- La capacité de filtrage est supérieure.
- Les filtres actifs réagissent en temps réel (de façon active) aux harmoniques présents pour les éliminer ; (Très bonne flexibilité et adaptabilité)

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie.
- Les pertes sont plus élevées.

### Classification des filtres actifs

On peut classer les filtres actifs selon plusieurs critères, comme :

- Sa configuration par rapport au réseau.
- Le type d'onduleur qu'il utilise.
- Le nombre de fils.

Concernant la configuration par rapport au réseau, on distingue le filtre actif shunt, filtre actif série, filtre actif universel.

### Filtrage shunt (Parallèle) :

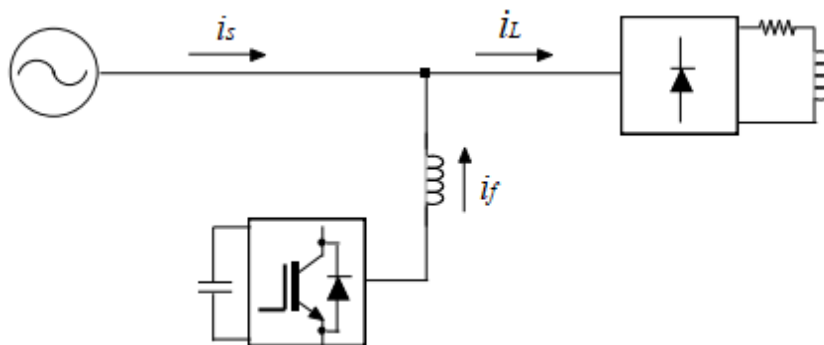


Figure 4.8. Filtrage actif shunt (Parallèle)

L'onduleur est connecté au réseau à travers un filtre **inductif**, et éventuellement un transformateur. Du côté continu, l'onduleur utilise une capacité comme source de tension. Le but de cette configuration est de découpler les perturbations provoquées par la charge polluante du réseau électrique amont. La charge polluante représentée par un redresseur alimentant une charge RL absorbe un courant  $i_L$  qui contient outre le fondamental des composantes harmoniques que le filtre actif doit éliminer en injectant en sens inverse dans le réseau un courant harmonique  $i_f$ , ainsi le courant de source  $i_s$  reste sinusoïdal et éventuellement en phase avec la tension.

### Filtrage série :

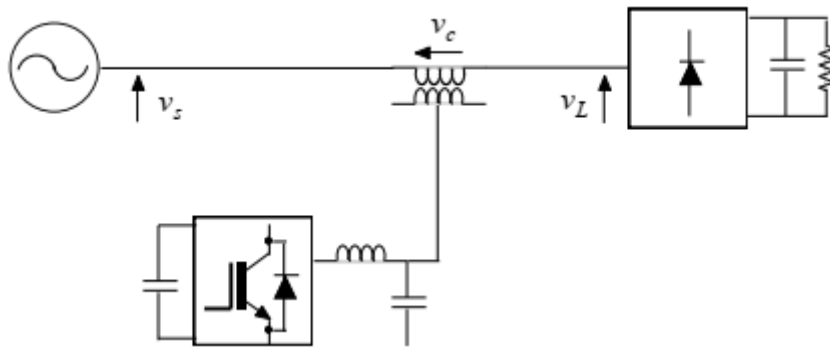


Figure 4.8. Filtrage actif série

Cette configuration est utilisée pour garantir **une onde de tension de qualité**. L'onduleur de tension est connecté au réseau à travers un filtre passif de type LC et un transformateur série. Le filtre actif doit injecter une certaine tension  $v_c$  à l'onde de tension perturbée  $v_L$ . Cette topologie peut jouer aussi le rôle d'un restaurateur dynamique de tension pour protéger la charge contre d'éventuels creux ou coupure de tension.

### Filtrage universel

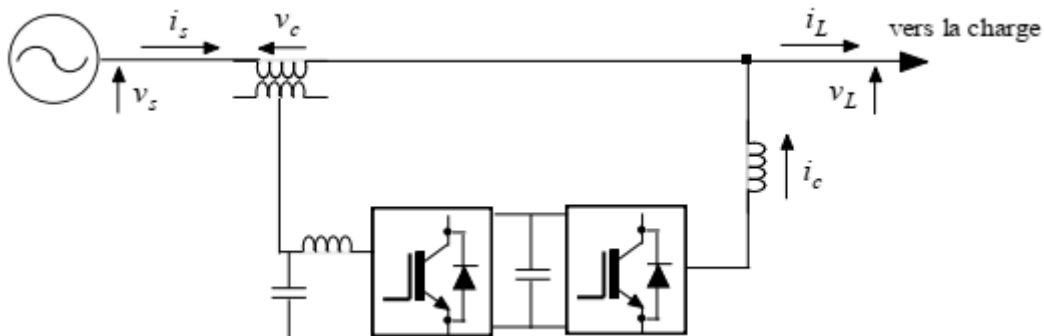


Figure 4.9. Filtrage actif universel

Cette configuration est une combinaison d'un filtre actif shunt et d'un filtre actif série. Cette structure permet d'améliorer la qualité de la tension.

Le filtre série a pour principales fonctions :

- ✓ Isoler les harmoniques entre la source et la charge polluante.
- ✓ Compenser la puissance réactive et les tensions déséquilibrées.

Le rôle du filtre shunt est :

- ✓ Absorber les courants harmoniques.
- ✓ Compenser la puissance réactive.

- ✓ Régulation de la tension du bus continu entre les deux filtres actifs.

### 3-3 Filtrage hybride

Le filtre hybride recombine entre des filtres actifs et passifs pour réduire la taille et le coût du filtrage.

- Un ou des filtres passifs sont accordés pour la suppression des harmoniques les plus persistants.
- Le filtre actif suit l'évolution de la charge et les rangs harmoniques élevés.

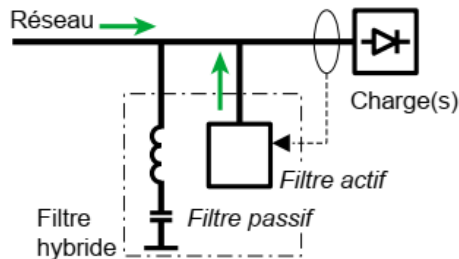


Figure 4.9. Schéma de principe du filtre hybride

#### Avantages du filtre hybride :

- Cumule les avantages des solutions de filtrage passif et actif et couvre un large domaine de puissance et de performances.
- Filtrage sur une large bande de fréquences (élimination des harmoniques de rangs 2 à 25).
- Compensation d'énergie réactive.
- Grande capacité de filtrage en courant.
- Bonne solution technico-économique pour un filtrage « réseau ».

#### 3-3-1 Filtre hybride shunt

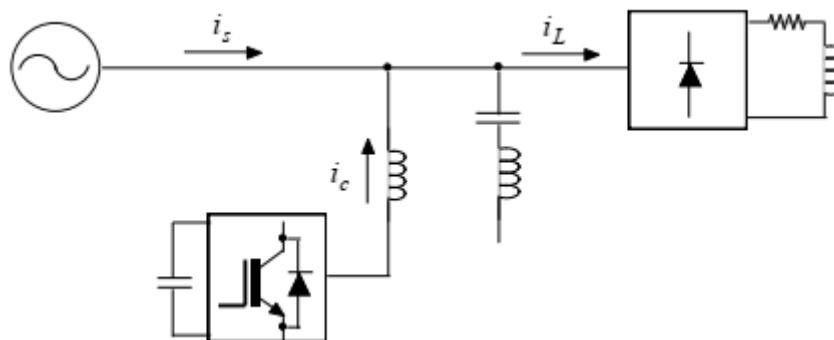


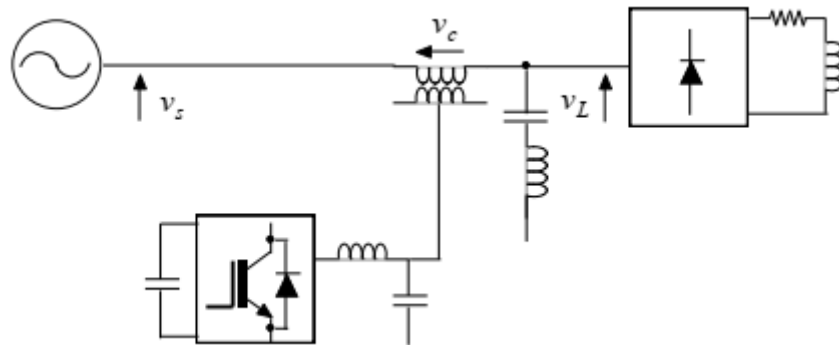
Figure 4.10. Filtre hybride shunt

Dans cette topologie :

- Le filtre passif shunt sert à éliminer le rang le plus faible (le 5<sup>ème</sup> par exemple).

- Le filtre actif shunt est conçu pour les autres rangs élevés.
- Le filtre actif peut protéger contre d'éventuelle résonance entre le filtre passif et l'impédance du réseau.

### 3-3-2 Filtre hybride série



**Figure 4.11.** Filtre hybride série

Le filtre hybride série est composé d'un filtre active série et d'un filtre passif shunt.

- Le filtre actif est utilisé pour éliminer les problèmes engendrés par le filtre passif (comme la résonance et l'influence de l'impédance de source), et améliorer les performances de compensation.
- Le filtre passif a pour rôle de dévier les courants harmoniques par sa capacité de modifier localement l'impédance du réseau.

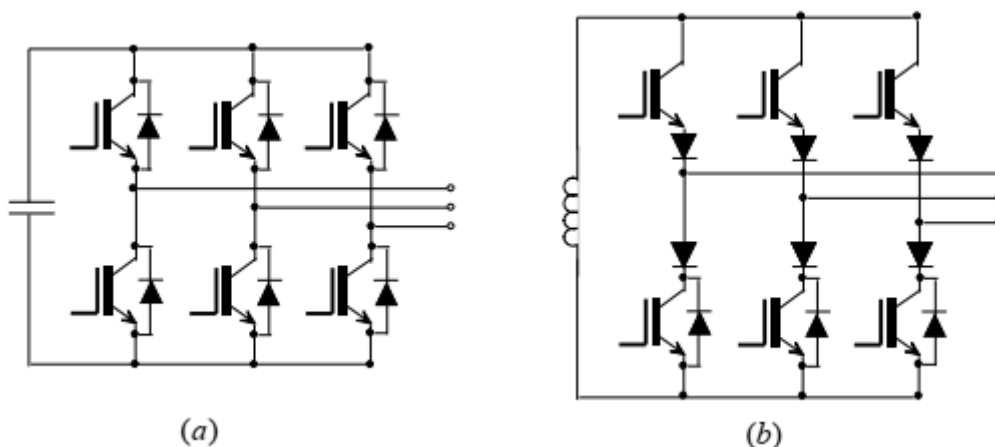
### 3-4 Convertisseurs du filtre actif :

Il y a deux types de convertisseurs pouvant servir de filtre actif :

Un onduleur de tension : Utilise une source de tension continue représentée par une capacité, Fig (a).

Cet onduleur est plus utilisé pour son meilleur rendement, sa taille, et son prix.

Un onduleur de courant : Utilise une source de courant représentée par l'inductance Fig (b).



**Figure 4-12** Convertisseurs de puissance applicables pour les filtres actifs triphasés

(a) onduleur de tension, (b) onduleur de courant.

### 3-5 Filtre actif triphasé à quatre fils

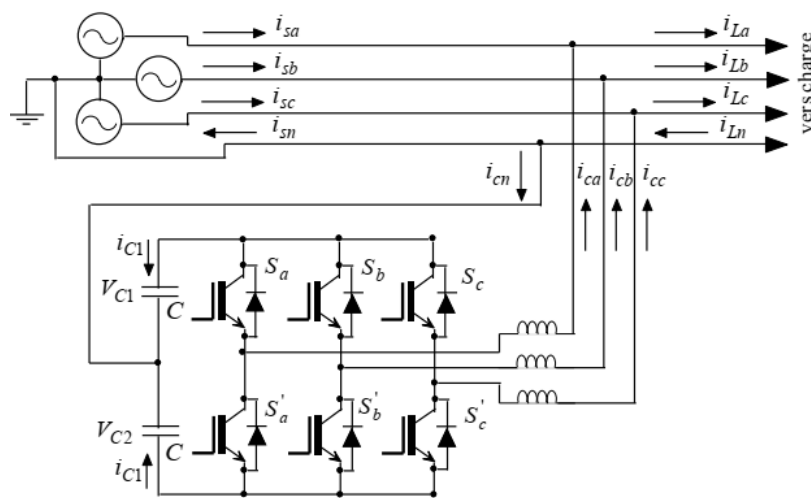
La plupart des charges connectées au réseau basse tension sont monophasées, utilisant le fil neutre (quatrième fil). Ce type de charge est généralement connu pour son courant très pollué en harmoniques, sans oublier les déséquilibres qui sont généralement inévitables et qui sont responsables de la surcharge du fil neutre. Le filtre actif triphasé à quatre fils offre :

- 1- Les qualités d'un filtre à trois fils
- 2- La réduction ou l'élimination du courant dans le neutre.

#### Topologies du filtre actif à quatre fils

L'implémentation de cette topologie de filtre actif peut être réalisée en utilisant deux structures d'onduleur de tension :

- a) Onduleur à trois bras, dit TLSC-VSI (Three-Leg Split-Capacitor Voltage Source Inverter) ;

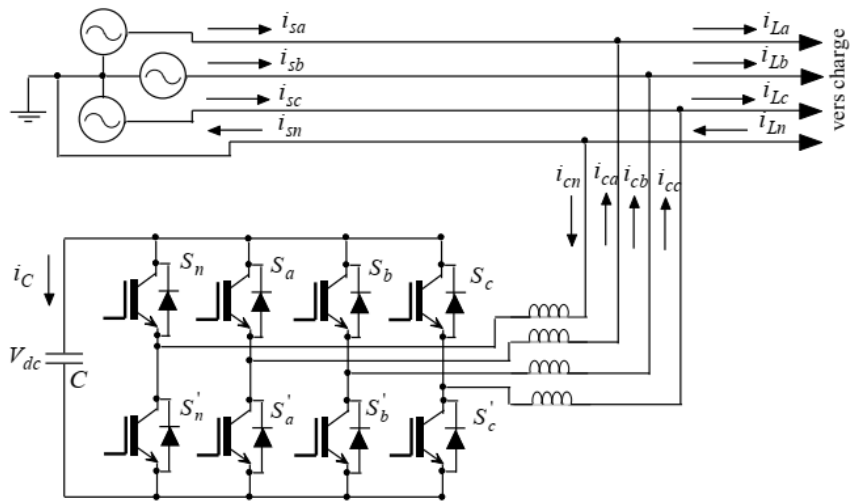


**Figure 4-13** Onduleur de tension type TLSC

Cette structure utilise un onduleur triphasé conventionnel. Le bus continu est formé par deux capacités en cascade, dont le point milieu est connecté au neutre du réseau. Cette connexion sert à compenser les courants homopolaires, mais le déséquilibre des tensions aux bornes des deux capacités pose un problème supplémentaire au contrôle du filtre actif.

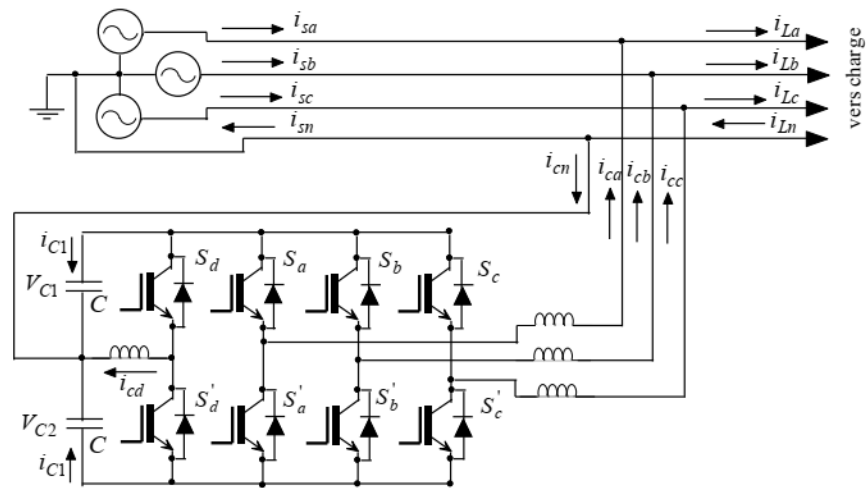
- b) Onduleur à quatre bras, dit FLFB-VSI (Four-Leg Full-Bridge Voltage Source Inverter).

Le bus continu utilise une capacité et le fil neutre est connecté à un quatrième bras. Cette structure simplifie le contrôle et permet une meilleure exploitation, et réduit la taille du bus continu, contrairement à la structure à trois bras qui a souvent besoin d'un bus continu plus large et d'un niveau de tension plus élevée.



**Figure 4-14** Onduleur de tension type FLFB

c) Onduleur de tension de type FLSC (Four-leg Split-Capacitor)



Cette structure complexe combine entre les deux structures précédentes.

## Normes relatives aux distorsions harmoniques

Les normes sont des directives, mise en place par des organisations d'expertises techniques, qui définissent les limites de stabilité et de fiabilité du réseau électrique. Ces directives concernent le producteur, le distributeur et le consommateur d'énergie électrique.

**Objectifs des normes :** Limiter les niveaux de distorsions harmoniques pour réduire leurs effets sur le réseau et les charges.

### Norme IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)

- Fixe les limites des taux de distorsions individuel et total des tensions.

| Bus voltage at PCC   | Individual $V_h$ , % | Voltage THD, % |
|----------------------|----------------------|----------------|
| $V < 69$ kV          | 3.0                  | 5.0            |
| $69 \leq V < 161$ kV | 1.5                  | 2.5            |
| $V \geq 161$ kV      | 1.0                  | 1.5            |

- Fixe les limites des taux de distorsions individuel et total des courants pour les charges non linéaires au PCC. Ces limites dépendent du rapport ( $I_{SC}/I_L$ ) entre le courant de court-circuit maximal  $I_{SC}$  du réseau et le courant de charge  $I_L$

#### 1) Réseaux de distribution

| $I_{sc}/I_L$ | $I_h/I_L$ , % — General distribution systems (120 V – 69 kV) |                  |                  |                  |             | THD (%) |
|--------------|--|------------------|------------------|------------------|-------------|---------|
|              | $h < 11$   | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ |         |
| < 20         | 4.0  | 2.0              | 1.5              | 0.6              | 0.3         | 5       |
| 20–50        | 7.0  | 3.5              | 2.5              | 1.0              | 0.5         | 8       |
| 50–100       | 10   | 4.5              | 4.0              | 1.5              | 0.7         | 12      |
| 100–1000     | 12   | 5.5              | 5.0              | 2.0              | 1.0         | 15      |
| > 1000       | 15   | 7.0              | 6.0              | 2.5              | 1.4         | 20      |



2) Réseaux de Répartition

| $I_{sc}/I_L$  | $I_h/I_L, \%$ — General subtransmission systems(69 – 161 kV) |                  |                  |                  |             | THD (%) |
|---|--|------------------|------------------|------------------|-------------|---------|
|   | $h < 11$   | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ |         |
| <b>Les limites sont la moitié de celles des réseaux de distribution</b> |  |                  |                  |                  |             |         |

3) Réseaux de Transport

| $I_{sc}/I_L$ | $I_h/I_L, \%$ — General transmission systems (> 161 kV) |                  |                  |                  |             | THD (%) |
|--------------|---|------------------|------------------|------------------|-------------|---------|
|              | $h < 11$  | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $h \geq 35$ |         |
| < 50         | 2.0   | 1.0              | 0.75             | 0.3              | 0.15        | 2.5     |
| $\geq 50$    | 3.0   | 1.5              | 1.15             | 0.45             | 0.22        | 3.75    |

**Norme IEC** (International Electrotechnical Commission)

**IEC 61000-2-2**

- Fixe les niveaux de compatibilité des tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.
- Pour cette norme :  $THDV \leq 8\%$  jusqu'au 40<sup>ème</sup> rang.

**Objectif** : protection des équipements raccordés au réseau.

| Harmoniques impairs |                          |               |                          | Harmoniques pairs |                          |
|---------------------|--------------------------|---------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|
| Non multiple de 3   |                          | Multiple de 3 |                          | Rang $h$          | Taux max. admissible (%) |
| Rang $h$            | Taux max. admissible (%) | Rang $h$      | Taux max. admissible (%) |                   |                          |
| 5                   | 6                        | 3             | 5                        | 2                 | 2                        |
| 7                   | 5                        | 9             | 1.5                      | 4                 | 1                        |
| 11                  | 3.5                      | 15            | 0.3                      | 6                 | 0.5                      |
| 13                  | 3                        | 21            | 0.2                      | 8                 | 0.5                      |
| 17                  | 2                        | > 21          | 0.2                      | 10                | 0.5                      |
| 19                  | 1.5                      |               |                          | 12                | 0.2                      |
| 23                  | 1.5                      |               |                          | > 12              | 0.2                      |
| 25                  | 1.5                      |               |                          |                   |                          |
| > 25                | $0.2 + 1.3 \times 25/h$  |               |                          |                   |                          |

**IEC 61000-2-4**

- Fixe les niveaux de compatibilité des tensions harmoniques appliquées au (PCC) sur les installations industrielles.

| IEC 61000-2-4 class 2 |         |                   |         |                        |         |
|-----------------------|---------|-------------------|---------|------------------------|---------|
| Harmonique impairs    |         | Harmoniques pairs |         | Impairs Multiples de 3 |         |
| $h$                   | $\%V_h$ | $h$               | $\%V_h$ | $h$                    | $\%V_h$ |
| 5                     | 6       | 2                 | 2       | 3                      | 5       |
| 7                     | 5       | 4                 | 1       | 9                      | 1.5     |
| 11                    | 3.5     | 6                 | 0.5     | 15                     | 0.3     |
| 13                    | 3       | 8                 | 0.5     | $\geq 21$              | 0.2     |
| 17                    | 2       | 10                | 0.5     |                        |         |
| 19                    | 1.5     | $\geq 12$         | 0.2     |                        |         |
| 23                    | 1.5     |                   |         |                        |         |
| 25                    | 1.5     |                   |         |                        |         |
| $\geq 29$             | $x$     |                   |         |                        |         |

$x = 0.2 + 12.5/h.$

### IEC 61000-3-2 et IEC 61000-3-4

✚ Définissent les limites des émissions des courants harmoniques pour les équipements raccordés au réseau basse tension, dont le courant par phase est respectivement inférieur ou égal et supérieur à 16 A.

**Objectif :** Réduire l'impact des courants harmoniques sur la tension, afin de respecter les limites de compatibilité.

| IEC 61000-3-2 | Harmoniques impairs |                             | Harmoniques pairs  |                             |
|---------------|---------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|
|               | Rang                | Courant max. admissible (A) | Rang               | Courant max. admissible (A) |
|               | $h$                 |                             | $h$                |                             |
|               | 3                   | 2.30                        | 2                  | 1.08                        |
|               | 5                   | 1.14                        | 4                  | 0.43                        |
|               | 7                   | 0.77                        | 6                  | 0.3                         |
|               | 9                   | 0.40                        | $8 \leq h \leq 40$ | $0.23 \times 8/h$           |
|               | 11                  | 0.33                        |                    |                             |
|               | 13                  | 0.21                        |                    |                             |
|               | $15 \leq h \leq 39$ | $0.15 \times 15/h$          |                    |                             |

| IEC 61000-3-4 | $h$ | Taux max. admissible (%) | $h$  | Taux max. admissible (%) |
|---------------|-----|--------------------------|------|--------------------------|
|               |     | 3                        | 21.6 | 19                       |
|               | 5   | 10.7                     | 21   | 0.6                      |
|               | 7   | 7.2                      | 23   | 0.9                      |
|               | 9   | 3.8                      | 25   | 0.8                      |
|               | 11  | 3.1                      | 27   | 0.6                      |
|               | 13  | 2                        | 29   | 0.7                      |
|               | 15  | 0.7                      | 31   | 0.7                      |
|               | 17  | 1.2                      | 33   | 0.6                      |

**Norme EN** (Normes Européens) : Approuvées par le Comité européen de normalisation électrotechnique

### EN 50160

✚ Fixe les niveaux de compatibilité des tensions harmoniques sur les réseaux basse et moyenne tension.

| Basse tension ( $\leq 1$ kV) |         |                   |         |                            |         |
|------------------------------|---------|-------------------|---------|----------------------------|---------|
| Harmoniques impairs          |         | Harmoniques pairs |         | Harmoniques multiples de 3 |         |
| $h$                          | $\%V_h$ | $h$               | $\%V_h$ | $h$                        | $\%V_h$ |
| 5                            | 6       | 2                 | 2       | 3                          | 5       |
| 7                            | 5       | 4                 | 1       | 9                          | 1.5     |
| 11                           | 3.5     | 6 ... 24          | 0.5     | 15                         | 0.5     |
| 13                           | 3       |                   |         | 21                         | 0.5     |
| 17                           | 2       |                   |         |                            |         |
| 19                           | 1.5     |                   |         |                            |         |
| 23                           | 1.5     |                   |         |                            |         |
| 25                           | 1.5     |                   |         |                            |         |

| Moyenne tension ( $1 \text{ kV} < V \leq 35 \text{ kV}$ ) |         |                      |         |                               |                |
|---|---------|----------------------|---------|-------------------------------|----------------|
| Harmoniques<br>impairs                                    |         | Harmoniques<br>pairs |         | Harmoniques<br>multiples de 3 |                |
| $h$   | $\%V_h$ | $h$                  | $\%V_h$ | $h$                           | $\%V_h$        |
| 5   | 6       | 2                    | 2       | 3                             | 5 <sup>†</sup> |
| 7   | 5       | 4                    | 1       | 9                             | 1.5            |
| 11  | 3.5     | 6 ... 24             | 0.5     | 15                            | 0.5            |
| 13  | 3       |                      |         | 21                            | 0.5            |
| 17  | 2       |                      |         |                               |                |
| 19  | 1.5     |                      |         |                               |                |
| 23  | 1.5     |                      |         |                               |                |
| 25  | 1.5     |                      |         |                               |                |

- ✚ Pour cette norme :  $\text{THDV} \leq 8\%$  jusqu'au 40<sup>ème</sup> rang.
- ✚ Aucune valeur n'est donnée pour les harmoniques d'ordres supérieurs à 25, car elles sont généralement insignifiantes.
- ✚ Les normes des courants harmoniques ne sont pas disponibles.

## Filtre actif parallèle

Principe de filtrage actif parallèle :

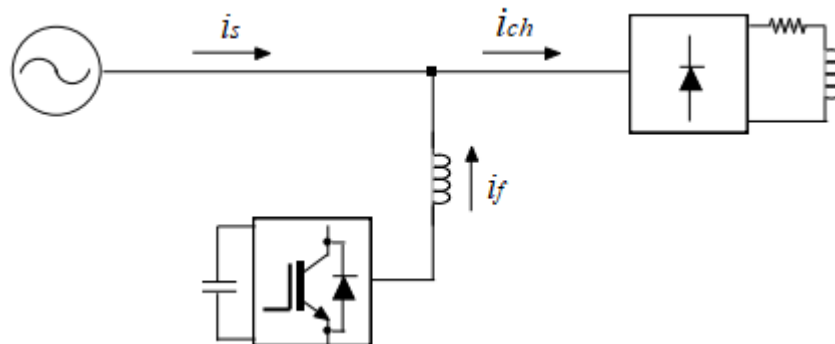


Figure . Filtrage actif shunt (Parallèle)

Le filtre actif parallèle est conçu pour fournir le courant de compensation  $i_f$  afin d'annuler les composantes harmoniques du courant de la charge non-linéaire  $i_{ch}$ , de telle sorte que le courant fourni par le réseau  $i_s$  soit sinusoïdal.

Le courant absorbé par la charge est donné par :

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{n=2}^{\infty} i_{chn}$$

$i_{cha}$  : composante active de  $i_{ch}$

$i_{chr}$  : composante réactive de  $i_{ch}$

$\sum_{n=2}^{\infty} i_{chn}$  Composantes harmoniques du courant  $i_{ch}$

Le courant fournit par la source est égale :  $i_s = i_{ch} - i_f$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance déformante et la puissance réactive :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{n=2}^{\infty} i_{chn}$$

## Description générale du filtre actif parallèle à structure tension :

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance alimentés par une source continue de courant ou de tension qui agissent comme des sources de courant harmonique en opposition de phase avec le courant de charge afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdale.

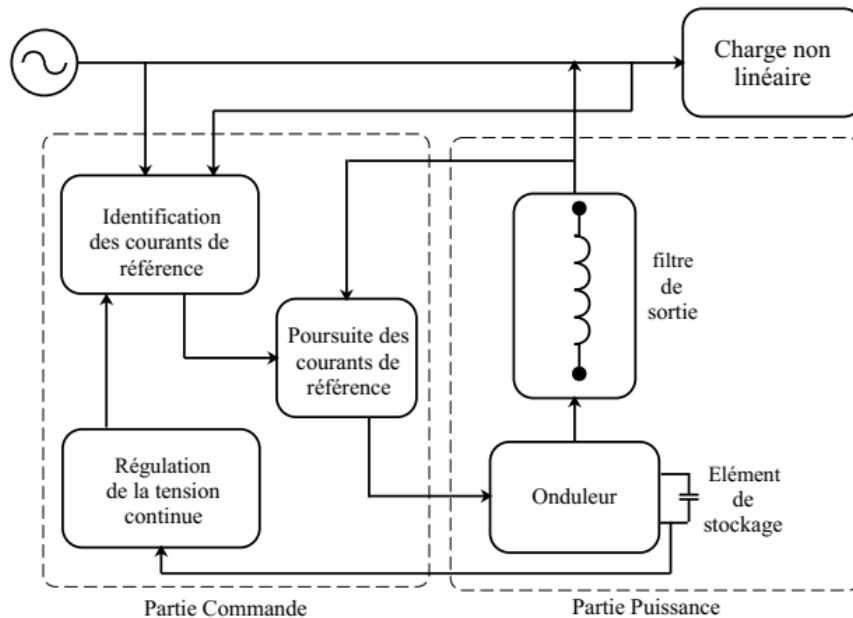


Figure .... Structure générale d'un FAP à structure tension

La structure du filtre actif se compose de deux parties :

- ✚ Partie puissance
- ✚ Partie commande

### Partie puissance

La partie puissance est constituée :

- 1- 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 antiparallèles.
- 2- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- 3- d'un filtre de couplage.

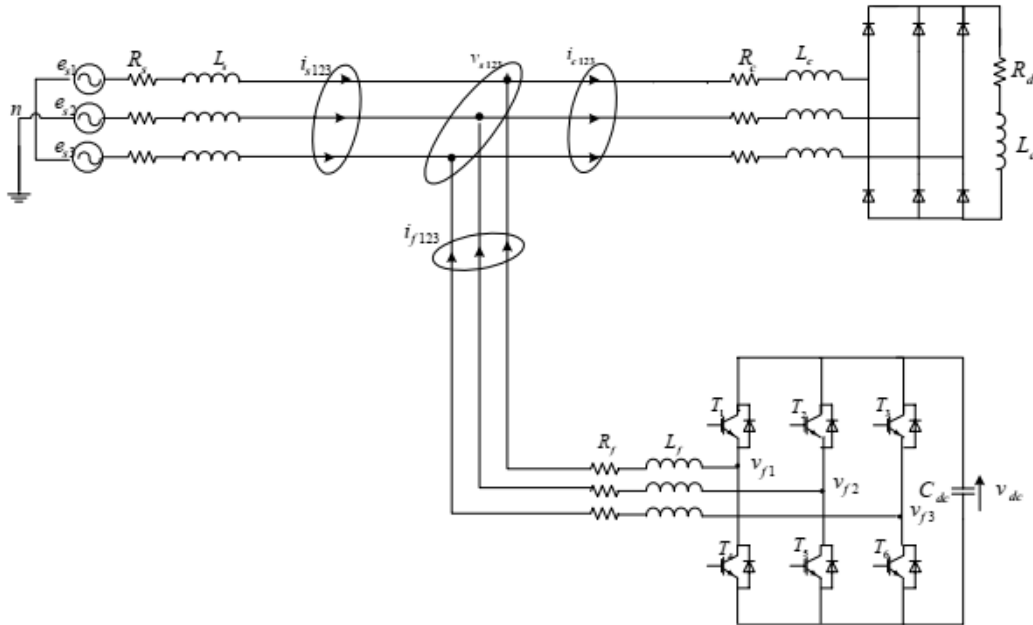
### Partie commande

La partie contrôle-commande est constituée de :

- 1- de la méthode d'identification des courants perturbés.
- 2- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- 3- de la régulation des courants injectés sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- 4- de la commande de l'onduleur de tension.

### Onduleur de tension à trois bras

Chaque bras de l'onduleur comporte deux interrupteurs bidirectionnels en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Le stockage de l'énergie côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur  $C_{dc}$  ayant à ses bornes une tension notée  $v_{dc}$ , régulée à une valeur positive. Ce condensateur joue le rôle d'une source de tension continue.



La commande des deux semi-conducteurs d'un même bras se fait d'une manière complémentaire, c'est-à-dire, si le premier est ouvert l'autre est fermé. Avec ce principe, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs dépendent de l'état des signaux de commande ( $S_1, S_2, S_3$ ) :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ ferme } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_4 \text{ ferme } T_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ ferme } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_5 \text{ ferme } T_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ ferme } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_6 \text{ ferme } T_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

Les tensions entre phases, imposées par l'onduleur, sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} - v_{f2} \\ v_{f2} - v_{f3} \\ v_{f3} - v_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_{dc}$$

Les tensions de sortie de l'onduleur, notées  $v_{fk}$ , avec  $k = \{1,2,3\}$ , sont référencées par rapport au neutre du réseau et vérifient les équations suivantes:

$$v_{fk} = v_{sk} + L_f \frac{di_{fk}}{dt} + R_f i_{fk}$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{aligned} v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} &= 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} &= 0 \end{aligned}$$

On déduit alors la relation suivante :

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0$$

Les équations des tensions de sortie de l'onduleur en fonction des états des interrupteurs sont alors exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3}$$

On pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif  $V_f$  (référéés au neutre n de la source), comme le montre le tableau ci-dessous, où  $V_f$  est la représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur ( $v_{f1}$ ,  $v_{f2}$ ,  $v_{f3}$ ) dans le repère orthogonal ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).

La figure (.....) représente ce vecteur dans le repère ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).

| $N^0$ Cas | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | $V_{f1}$     | $V_{f2}$     | $V_{f3}$     | $V_f$  |
|-----------|-------|-------|-------|--------------|--------------|--------------|--|
| 0         | 0     | 0     | 0     | 0            | 0            | 0            | 0  |
| 1         | 1     | 0     | 0     | $2v_{dc}/3$  | $-v_{dc}/3$  | $-v_{dc}/3$  | $\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$                      |
| 2         | 0     | 1     | 0     | $-v_{dc}/3$  | $2v_{dc}/3$  | $-v_{dc}/3$  | $\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} e^{j\frac{2\pi}{3}}$  |
| 3         | 1     | 1     | 0     | $v_{dc}/3$   | $v_{dc}/3$   | $-2v_{dc}/3$ | $\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} e^{j\frac{\pi}{3}}$   |
| 4         | 0     | 0     | 1     | $-v_{dc}/3$  | $-v_{dc}/3$  | $2v_{dc}/3$  | $\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} e^{-j\frac{2\pi}{3}}$ |
| 5         | 1     | 0     | 1     | $v_{dc}/3$   | $-2v_{dc}/3$ | $v_{dc}/3$   | $\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} e^{-j\frac{\pi}{3}}$  |
| 6         | 0     | 1     | 1     | $-2v_{dc}/3$ | $v_{dc}/3$   | $v_{dc}/3$   | $\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} e^{-j\pi}$            |
| 7         | 1     | 1     | 1     | 0            | 0            | 0            | 0  |



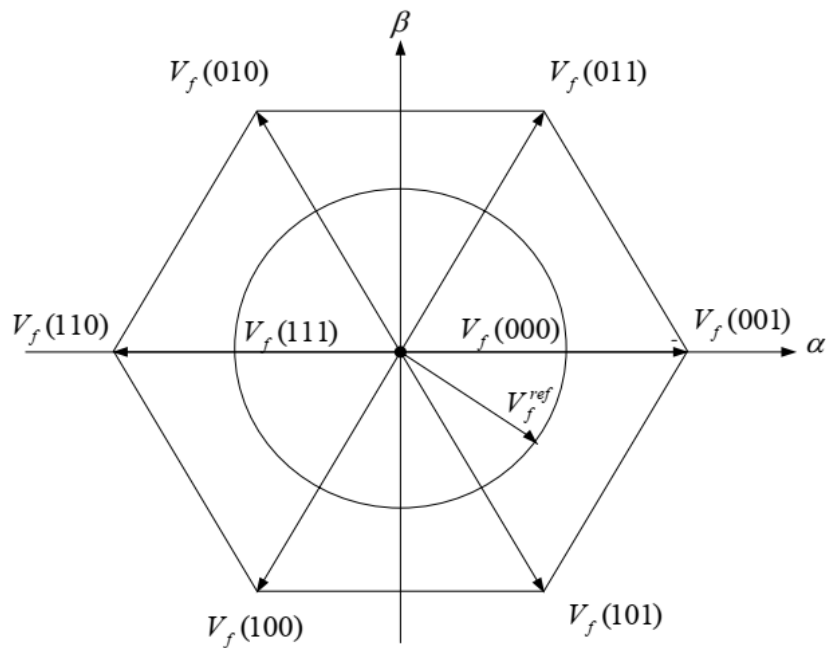


Figure (.....) : Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur de tension à trois bras

### Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé

L'équation de tension par phase du filtre actif parallèle triphasé est donnée par :

$$v_{sk} = v_{fk} - v_{L_{fk}} - v_{R_{fk}}$$

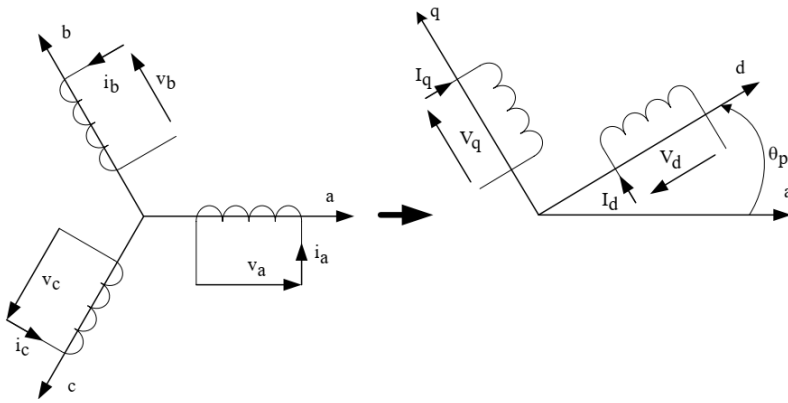
$$= v_{fk} - L_f \frac{di_{fk}}{dt} - R_f i_{fk}, \quad k = 1, 2, 3$$

Alors, les équations des trois phases sont donnés par :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{f1} \\ i_{f2} \\ i_{f3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix}$$

$$\underline{x}_p = P(\theta_p) \underline{x} = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix}$$

$$P(\theta_p) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_p & \cos(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_p - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta_p & -\sin(\theta_p - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_p - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$



$i_0$  étant nul dans le cas d'un système triphasé équilibré, une forme simplifiée de la transformée est:

$$\underline{x}_c = C\underline{x}$$

$$\underline{x}_c = \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix}, \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \text{ et } C=P(0) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}.$$

## Techniques d'extraction des courants harmoniques

### Identification dans le domaine fréquentiel :

- Transformée de Fourier discrète (DFT)
- Transformée de Fourier rapide (FFT)
- Transformée de Fourier discrète récursive (RDFT)
- Filtre de Kalman

Inconvénients : Le nombre important des itérations de calcul et la lenteur du temps de réponse par rapport au temps exigé pour les applications du filtrage en temps réel.

### Identification dans le domaine temporel :

Avantages par rapport aux méthodes dans le domaine fréquentiel :

- La rapidité
- Le temps minime de calcul

#### 1) Méthode des puissances active et réactive instantanées :

Passage des systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, vers un système diphasé (repère  $\alpha\beta$ ) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances instantanées.

#### 2) Méthode du référentiel synchrone :

Les courants triphasés de la charge sont exprimés dans le système (dq) en utilisant dans chaque phase une boucle à verrouillage de phase, **PLL** (Phase Locked Loop), pour détecter la position angulaire  $\theta$  du

référentiel synchrone **dq**. Ce dernier est synchronisé avec les tensions triphasées et tourne à une vitesse constante.

3) Méthode du filtre Notch :

Le courant de charge est filtré par un filtre coupe-bande (Filtre Notch) qui élimine la composante fondamentale tout en laissant passer les composantes harmoniques.