

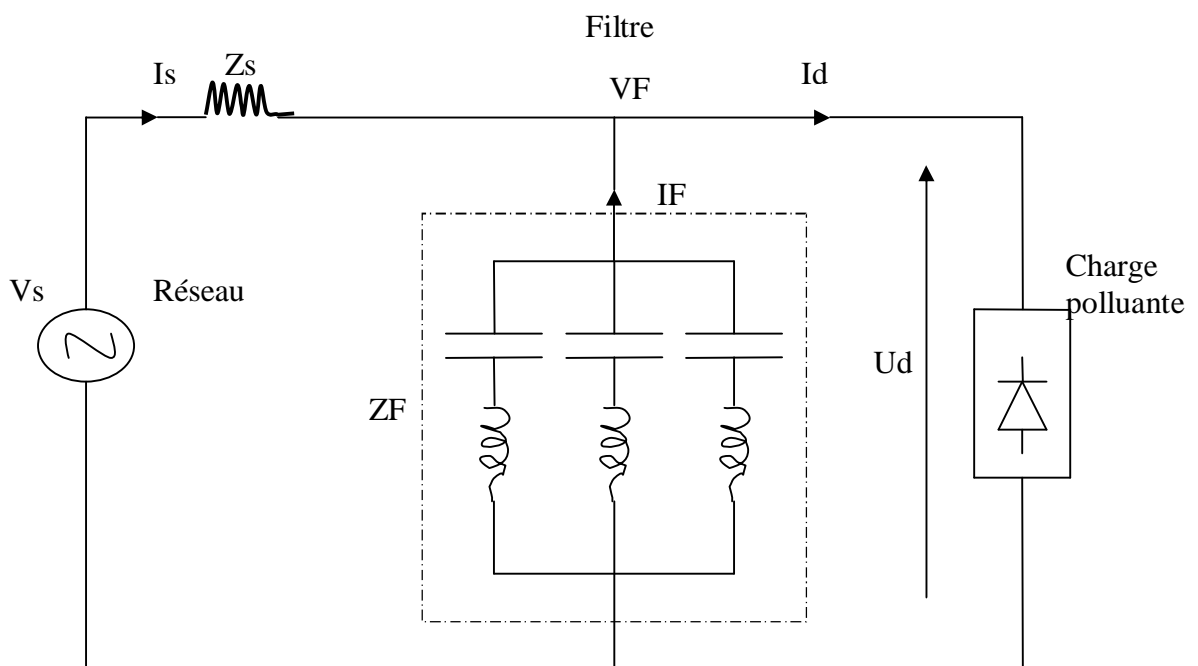
*Chapitre III*

*Filtrage passif dans la compensation  
hybride*

### Introduction

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques, et dans ce chapitre on passe pour présenter et étudier la solution plus fréquemment mise en œuvre est le filtrage passif pour réduction des harmoniques.

Ce filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau **Figure (III)**. [3]



**Figure (III) : l'emplacement du filtrage passif**

#### III-1. Principe de filtrage passif

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dévier les courants harmoniques et à diminuer les tensions harmoniques là où c'est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée sur une fréquence choisie. [3]

### III-2. Conception des filtres passifs

Un filtre passif est utilise pour:

Ø Réduire les harmoniques au minimum possible.

Ø Fournir une puissance réactive à une fréquence fondamentale.

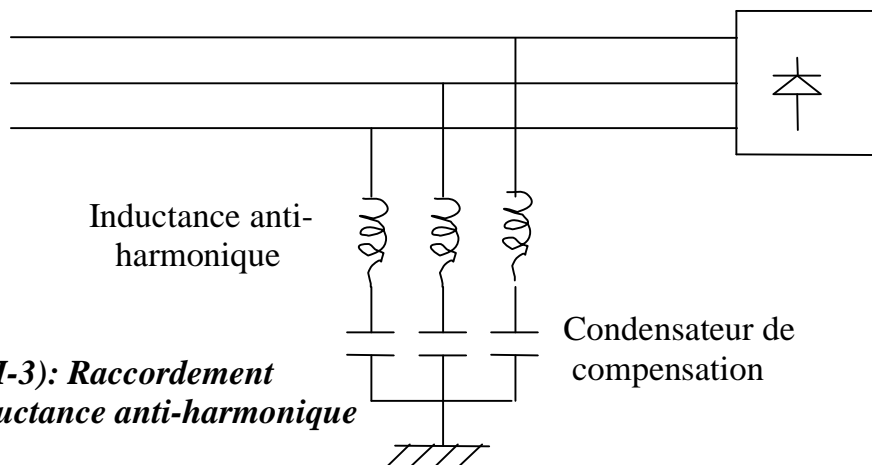
Ø Atteindre ces objectifs en même temps avec un prix minimum, à la fréquence fondamentale, le filtre à une impédance capacitive. Il crée de la puissance réactive, ce réactif sert à compenser le réactif absorbé par le convertisseur. Malheureusement le réactif crée est constant, alors que celui absorbé est variable, d'où un problème de choix de la charge pour laquelle la compensation est réalisée. [5]

### III-3. Inductance anti-harmonique

Cette première solution consiste à installer une inductance en série avec les condensateurs de compensation sur chaque branche monophasée **Figure (III-3)**. Ce type de filtre se comporte comme un court-circuit à sa fréquence d'accord.

Ce dispositif a pour objectif essentiel de protéger les batteries de condensateurs d'une surintensité due aux harmoniques. Il a en outre pour effet de réduire les tensions harmoniques aux bornes de ces condensateurs. Il permet souvent de réduire les valeurs d'impédance harmonique du réseau. [5]

Ce type de filtre présente une résonance parallèle (anti-résonance) avec l'inductance du réseau sur lequel il est raccordé, on l'accorde sur une fréquence inférieure à celle de la première injection de courant harmonique (250HZ en générale).

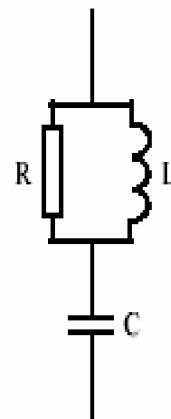
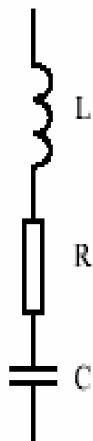


**Figure (III-3): Raccordement d'une inductance anti-harmonique**

Les inductances anti-harmoniques accordées à une fréquence supérieure à 175Hz. Peuvent cependant poser des problèmes vis-à-vis des signaux de télécommandes centralisés. D'autre part l'installation d'inductances anti-harmoniques accroît la tension permanente à 50Hz aux bornes des condensateurs, qui doivent donc être dimensionnés en conséquence. Cette surtension est d'autant plus importante que la fréquence d'accord du filtre est basse. [5]

#### **III-4. Les types de filtrage passif**

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant **Figure (III-4-a)** et le filtre passif amorti ou passe-haut **Figure (III-4-b)**.



**Figure (III-4-a) : Filtre passif résonnant**

**Figure (III-4-b) : Filtre passif amorti**

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants.

Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

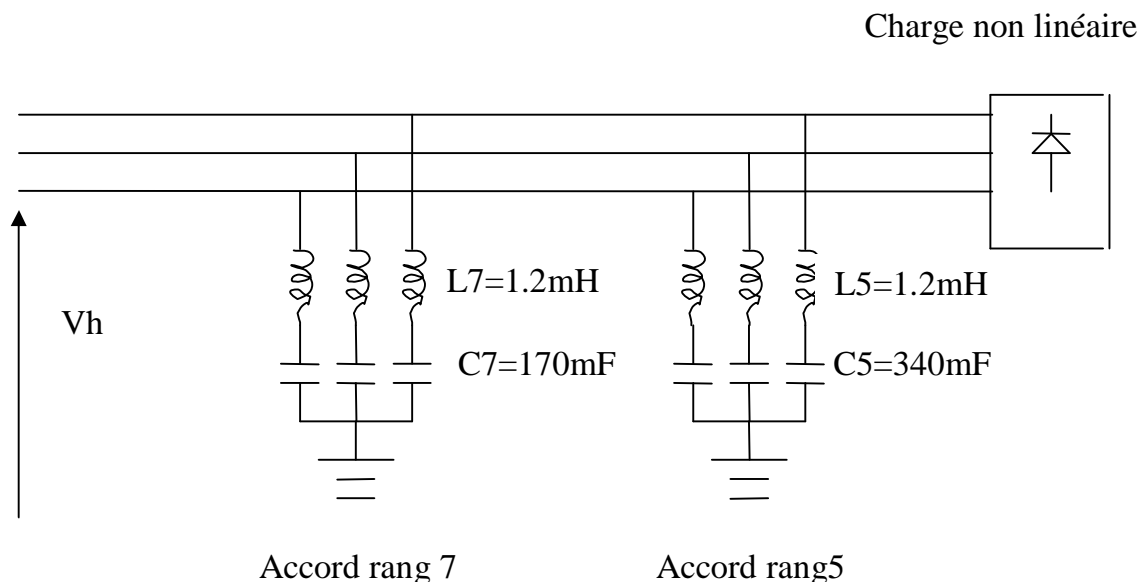
- Ø Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Ø Équipements volumineux,
- Ø Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

### **III-5-a. Filtre résonant**

A l'inverse d'une inductance anti-harmonique, un filtre résonant a pour objet de présenter une impédance très faible au passage d'un courant harmonique à un rang déterminé. [4]

La constitution d'un filtre résonant est semblable à celle d'un ensemble inductance anti-harmonique plus condensateur de compensation. Trois différences existent cependant: [5]

- Ø Le facteur de qualité d'un filtre résonant est élevé, l'accord du filtre est donc très pointu.
- Ø On installe souvent plusieurs filtres résonants en parallèle, correspondant aux différents rangs harmoniques à filtrer **Figure (III-5-a-1)**.
- Ø Un filtre est calculé au cas par cas alors qu'une inductance anti-harmonique est un élément standard.

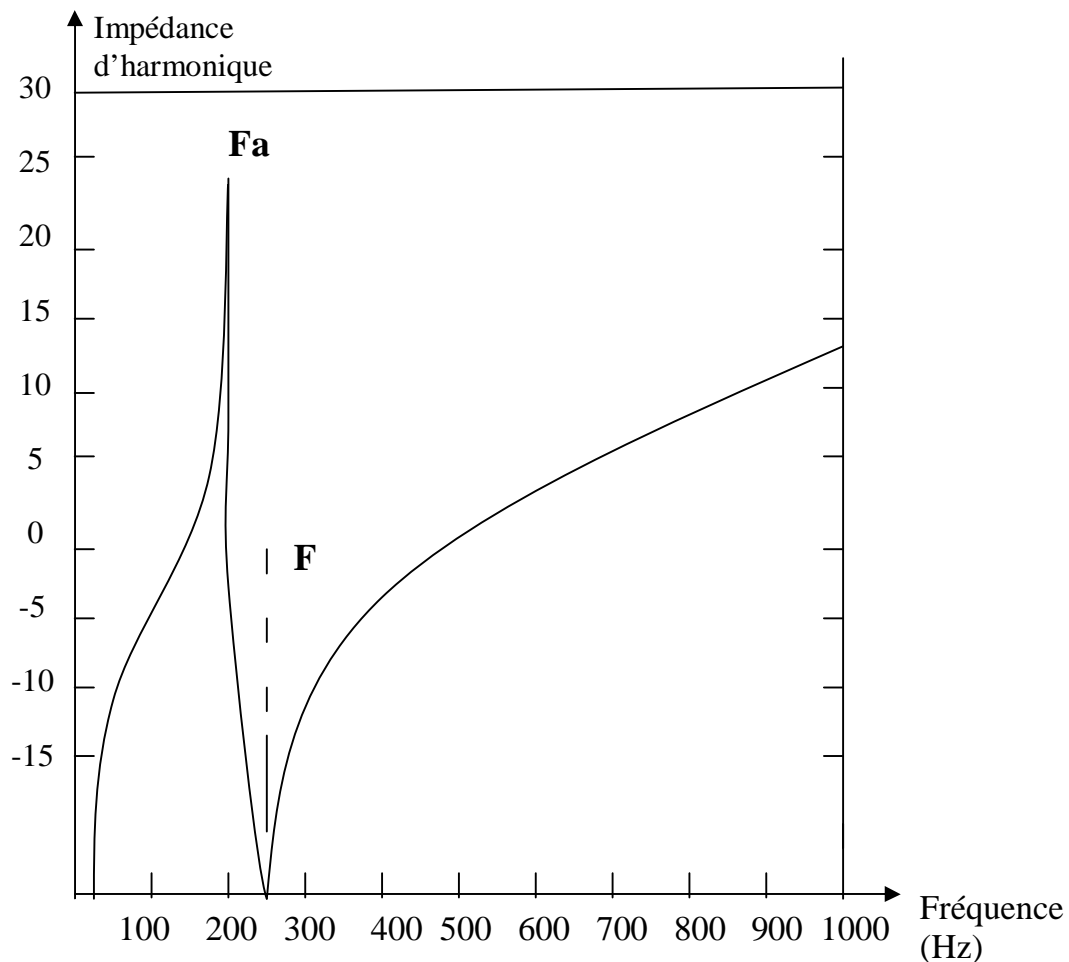


**Figure (III-5-a-1) : Installation de filtre résonant**

Les filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance (due à la qualité de réalisation) ou de la capacité (due au vieillissement ou à la température), ce qui entraîne un désaccord de l'ensemble. Cette dérive est plus marquée pour les filtres utilisant des condensateurs de faible capacité. [5]

A fin d'ajuster la fréquence du filtre à la mise en service, l'inductance doit être munie de prises de réglage.

L'installation d'un filtre résonant donne naissance pour le réseau à une impédance harmonique dont l'allure est représentée dans le cas présent *Figure (III-5-a-2)*, la fréquence d'accord correspond au rang harmonique 5.



*Figure (III-5-a-2) : Impédance de c filtre résonant*

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

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

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

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

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

La performance d'un filtre résonnant est caractérisée par la tension harmonique entre ses bornes  $V_{fh}$ . Cette tension se calcule à partir du courant harmonique  $I_{dh}$  traversant l'impédance du réseau  $Z_s$  en parallèle avec l'impédance  $Z_f$  du filtre, calculées à une fréquence  $h$  fois celle du fondamental : [5]

$$V_{fh} = \frac{Z_f \cdot h \cdot Z_s}{Z_f + h \cdot Z_s} I_{dh}$$

Or au voisinage de l'accord, le module de  $Z_f$  s'écrit :

$$Z_s = \frac{1}{c \omega_1 h} \sqrt{\frac{1}{Q^2} + 4\delta}$$

Avec :

$$Q = \frac{L \omega_1 h}{r} : \text{Coefficient de qualité de l'inductance série.}$$

$$\delta = \frac{\Delta \omega}{\omega_1} : \text{Précision d'accorde.}$$

Comme:  $Z_F \ll Z_s$ , on obtient:

$$V_{Fh} = Z_F I_{dh}$$

Le filtre sera plus performant avec  $Q$  grand et  $\delta$  Faible. Il faut noter qu'il existe toujours une antirésonance pour un range  $H_a$  inférieur à celui de l'accorde= due à l'inductance  $L_s$  du réseau.

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

Les filtres passe-haut, beaucoup moins sélectifs, atténuent les harmoniques supérieurs ou voisins de leur rang d'accord. **Figure (III-5-a-2)** représente l'évolution de leur impédance en fonction de la fréquence. Avec un amortissement plus important, les filtres passe-haut présentent des performances moins bonnes que celles des filtres résonnants. En revanche, les conséquences d'une variation de la capacité ou de la fréquence sont plus limitées.

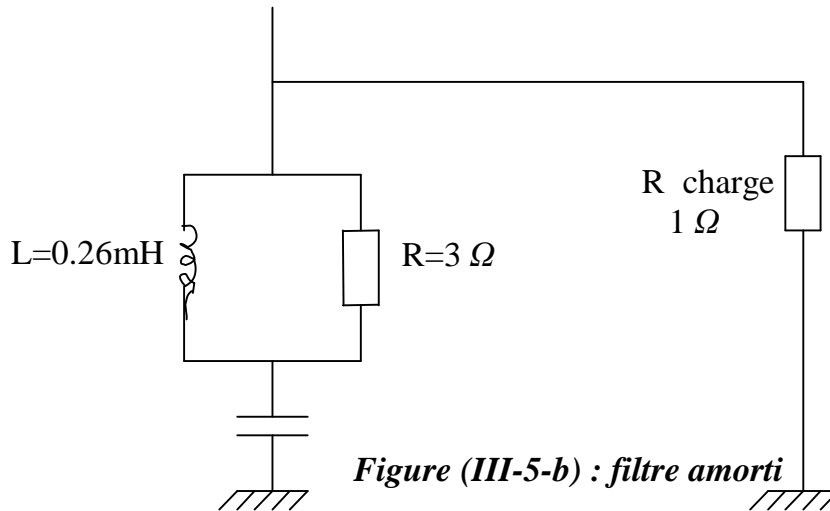
### **III-5-b. Filtre amorti**

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées en sont pas trop élevées, on l'utilise souvent pour filtrer simultanément les plus hautes fréquence du spectre, et non une fréquence particulière, c'est un filtre passe haut. Le schéma monophasé équivalent de l'installation d'un tel filtre est montré ci-dessous. [4]

Il est moins sensible aux variation de ses éléments (capacité, inductance, et résistance) qu'un filtre résonant. La résistance d'amortissement influe légèrement sur la fréquence

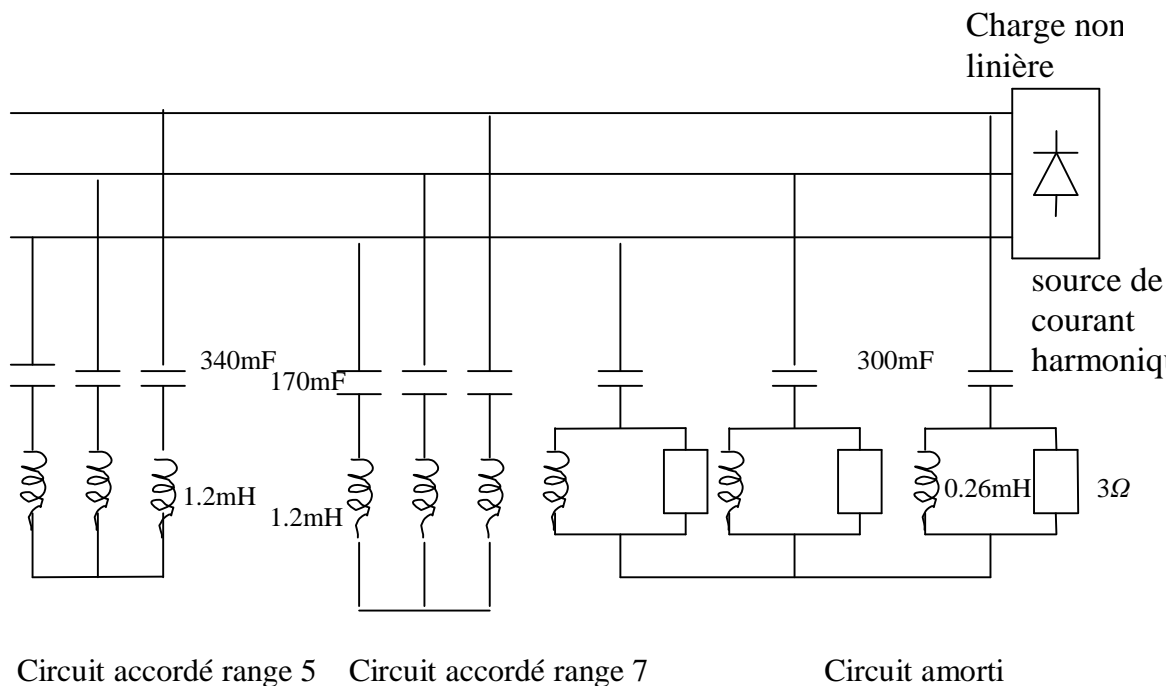


d'accord. Les filtres amortis d'ordre 2 sont les plus répandus. Il existe également des filtres amortis d'ordre 3 qui comportent deux éléments capacitifs par phase au lieu d'un.



### III-6. Circuits accordé

Souvent on associe aux filtres résonants un filtre amorti pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre. La **Figure (III-6)** figure2.6 ci-dessous montre le schéma d'un filtre passif relié à un réseau électrique.



**Figure (III-6) : circuits accordés sur les ranges harmoniques (5, 7, 11)**

On utilise les circuits accordés sur les rangs harmoniques (5, 7, 11) parce que ce sont les harmoniques qui ont des amplitudes respectivement élevée dans le spectre de fréquence. En pratique, lorsqu'un besoin de filtrage devient nécessaire, il est courant de mettre en œuvre des filtre résonant accordés sur les premières rangs harmoniques (5, 7) ou les injection de courant sont importantes. Un filtre amorti pour limiter l'impédance harmonique sur le réseau du spectre ( $>11$ ).

L'anti-résonance des filtres provoque une amplification des ranges harmonique inférieure à la fréquence de résonance du filtre. La valeur de l'impédance du réseau à la fréquence d'anti-résonance, conditionne fortement l'allure de la courbe de l'impédance en fonction de fréquence.

On accorde donc le premier à la première fréquence d'injection (généralement 250HZ) de façon à ne pas faire coïncider avec la fréquence d'anti-résonance

### **III-7. Inconvénients des filtres passifs**

Le Filtre passif entre en résonance série avec la source, ce qui fait apparaître une distorsion de tension, qui donne naissance à un excès de courant harmonique qui peuvent passer à travers le filtre passif, et le détruire.[3]

La variation des l'impédance de la source influe considérablement sur les caractéristiques de filtrage.

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.

Effets sur la propagation des signaux de télécommande centralisée, utilisés par les distributeurs d'énergie. La propagation des signaux de télécommande à la fréquence 175Hz, sur les réseaux HT et BT, et dans certains cas perturbée par la présence d'inductances anti-harmoniques ou des filtres passifs. L'injection du signal à 175HZ est réalisée en aval des transformateurs des postes source à l'aide d'un transformateur dont le secondaire est inséré en série avec le réseau.

Le fonctionnement en parallèle de plusieurs filtres passifs entraîne la circulation de courants harmoniques très importants qui provoquent rapidement leur destruction. Ce cas est inévitable si l'on considère que la fréquence d'accord varie lentement avec le vieillissement des condensateurs. <<Il faut donc absolument éviter de raccorder des filtres harmoniques de même rang sur un même réseau >>.

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.

### III-7. Calcule des filtres passifs

Un circuit accorde (RLC) à une impédance :

$$Z=R+J(L\omega - 1/C\omega).....6$$

Z : impédance complexe du circuit

R : résistance

$L\omega$  : réactance inductive

$1/C\omega$  : réactance capacitive

A sa fréquence de résonance son impédance se réduit à une petite valeur soit R.[10]

Car : la fréquence indicative devient égale à la réactance, et on peut écrire.

$$L\omega = 1/C\omega_r.....7$$

$\omega_r$  est la fréquence de résonance, elle est égale à :

$$\omega_r = 2\pi F_r.....8$$

Tel que :

$\omega_r$  est la pulsation de résonance.

$F_r$  est la fréquence de résonance, elle est égale à :

$$F_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots\dots\dots 9$$

La réactance inductive ou capacitive qui correspond à cette fréquence est :

$$X_r = \omega_r L = 1/\omega_r C$$

D'où :

$$\omega_r^2 LC = 1 \dots\dots\dots 10$$

$$X_r = \sqrt{\frac{L}{C}} \dots\dots\dots 11$$

Dans le cas d'un filtre résonance, le facteur de qualité est défini comme étant le

$$Q = \frac{X_r}{R} \dots\dots\dots 12$$

Par conséquent, la capacité et l'inductance respective du filtre en fonction de Q sont :

$$L = \frac{X_0}{\omega_r} = \frac{RQ}{\omega_r} \dots\dots\dots 13$$

$$C = \frac{1}{\omega_r X_0} = \frac{1}{\omega_r RQ} \dots\dots\dots 14$$

En pratique un filtre résonant n'est pas exactement accordé sur une fréquence harmonique à cause de :

la variation dans la fréquence fondamentale (50Hz). Ce qui fait varier proportionnellement les fréquences harmoniques.

Des variation dans la valeur de capacité (C) et de la valeur de l'inductance (L) due aux vieillissements et l'échauffement de ces éléments.

Le désaccord initial cause par les températures de fabrication de L et C.

Les performances d'un filtre sont, largement déterminées à partir de son facteur de qualité (Q) et sa déviation relative de la fréquence ( $\delta$ ) défini par l'équation suivante :

$$W = w_r (1 \pm \delta) \dots\dots\dots 15$$

Une variation de 2% dans la valeur de L et C (due aux tolérances de fabrication), provoque le même désaccord qu'une variation de 1% de la fréquence du système.

La déviation relative de fréquence ( $\delta$ ) peut être exprimée en fonction des variations de L et C.

$$\delta = \frac{\Delta W_w}{W} = \frac{\Delta F}{F} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right) \dots\dots\dots 16$$

$$\frac{\Delta \omega}{\omega} : \text{Représente la variation relative de la pulsation.}$$

L'impédance du filtre peut être exprimée en fonction du facteur de qualité et de la déviation relative de la fréquence.

$$Z_F = R \left[ 1 + j\delta Q \left( \frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right] \dots\dots\dots 17$$

Pour les petites déviations de fréquence ou ( $\delta$ ) est  $\ll 1$  on peut écrire :

$$Z_F \cong R(1 + j2\delta Q) \dots\dots\dots 18$$

Cette équation montre que l'impédance du filtre à sa fréquence de résonance peut être diminuée, en fonction de la valeur de (R).

**III-7. Minimisation de la tension harmonique ( $V_h$ )**

La tension harmonique est donnée par :

$$V_h = Z_{eq} I_h \dots \dots \dots 19$$

$Z_{eq}$  : l'impédance équivalente du filtre et de la source.

$I_h$  : le courant harmonique.

Cela veut dire que pour diminuer la tension harmonique, il ne faut pas diminuer seulement l'impédance du filtre ; mais il faut diminuer l'impédance équivalente du filtre et de la source.

$$V_h = Z_{hf} \cdot Z_{hs} / (Z_{hf} + Z_{hs}) I_h = I_h / (Y_{hf} + Y_{hs}) \dots \dots 20$$

$Z_{hf}$  : impédance harmonique d'ordre (h).

$Z_{hs}$  : impédance harmonique du réseau (impédance de la source).

$Y_{hf}$  : admittance du filtre

$Y_{hs}$  : admittance du réseau (source)

L'admittance du filtre peut être écrite sous la forme :

$$Y_f = 1/Z_f = G_f + jB_f \dots \dots \dots 21$$

$G_f$  : la conductance du filtre.

$B_f$  : la susceptance du filtre.

De l'équation (12) on peut écrire :

L'admittance approximative du filtre, en fonction du facteur de qualité et du coefficient de déviation de fréquence est donnée par l'expression suivante :

$$Y_f \cong \frac{1}{R(1 + j2\delta Q)} = \frac{Qj2Q\delta}{X_0(1 + 4\delta^2 Q^2)} \dots \dots \dots 22$$

$$|Y_f| = \frac{1}{R\sqrt{1+j2\delta Q}} = \frac{Q}{X_0(1+4\delta^2 Q^2)} \dots\dots\dots 23$$

La conductance, et la susceptances du filtre en fonction du facteur de qualité et le coefficient de déviation relative de fréquence sont données respectivement par les deux formules suivantes :

$$G_f \cong \frac{1}{R(1+4\delta^2 Q^2)} = \frac{Q}{X_r\sqrt{1+4\delta^2 Q^2}} \dots\dots\dots 24$$

$$B_f \cong \frac{2\delta Q}{R(1+4\delta^2 Q^2)} = \frac{2\delta Q}{X_f(1+4\delta^2 Q^2)} \dots\dots\dots 25$$

En réalité il y a plusieurs variables qui entrent dans la conception du filtre passifs. Les variables qui ne sont pas sous le contrôle du concepteur, et qui sont le coefficient de déviation maximale de la fréquence ( $\delta$ ) et l'impédance de la source ( $Z_s$ ) sont choisies de telle façon qu'il donnent une valeur de la tension harmonique élevée. [5]

Pour un réseau purement inductif nous pouvons écrire:

La tension harmonique en fonction des conductances et des susceptances peut être écrite:

$$V_h = \frac{I_h}{\sqrt{(G_{hf} + G_{hs})^2 + (B_{hf} + B_{hs})^2}} \dots\dots\dots 26$$

En cas de résonance nous pouvons mettre  $G_{hs}=0$ ,  $B_{hf} + B_{hs}=0$ , et on aura l'expression simplifiée :

$$V_h = \frac{I_h}{G_{hf}} \dots\dots\dots 27$$

En remplaçant ( $G_{hf}$ ) par sa valeur dans l'expression (24) et pour une valeur de  $\delta = \delta_m$  on peut écrire:

$$V_h = X_r \left( Q^{-1} + 4\delta^2 Q \right) I_h \dots\dots\dots 28$$

La tention harmonique est minimale pour une valeur optimale du facteur de qualité en fonction du coefficient de déviation maximale de fréquence.

$$Q=Q_0 = \frac{1}{2\delta_m} \dots\dots\dots 29$$

Ce qui donne :  $V_h=4\delta_m X_r I_h \dots\dots\dots 30$

### **3-4. Réseau avec une impédance a angle limite**

Supposons que l'impédance de réseau a un angle limite entre  $\pm \Phi_m$ , ou  $0 < \Phi_m < 90$ , Il est montre que la tension harmonique la plus élevée correspond a une valeur de l'angle  $\Phi = \Phi_m$  et a un signe oppose par rapport a  $(\delta)$  c'est de la qu'il faut trouver la valeur qui minimise  $|Y_h|$  et maximise la valeur de  $V_h$ . d'après l'équation (12) l'impédance harmonique du filtre peut être écrite sous la forme:[5]

$$Z_{hf} = X_f \left( Q^{-1} + 2j\delta_m \right) \dots\dots\dots 31$$

Les formule pour une valeur optimale du facteur de qualité correspondants a  $Y_{hf}$ ,  $Y_{hs}$ ,  $Y_{hs}$ , peuvent être détermines par construction tigonometrique en déterminant au début le diamètre du cercle de valeur  $1/2\delta_m X_r$  et angle  $\Phi_m$ .

$$y_{hf} = \frac{\cos(\Phi_m/2)}{2\delta_m X_r} \dots\dots\dots 32$$

$$|Y_{hs}| = |Y_{hf}| \sin \frac{\Phi_m}{2} = \cos(\Phi_m/2) \sin(\Phi_m/2) \frac{1}{2\delta_m X_r} \dots\dots 33$$

La valeur optimale du facteur de qualité est:  $\tan(\Phi_m) = \frac{X_r}{R} = \frac{2\delta_m X_r}{X_r/Q} = 2\delta_m Q \dots\dots\dots 34$

$$Q_0 = \frac{\cos(\Phi_m) + 1}{2\delta_m \sin(\Phi_m)} \dots\dots\dots 35$$



$$V_h = \frac{I_h}{|y_h|} = \frac{4\delta m X_r}{\cos(\Phi_m) + 1} I_h \dots\dots\dots 36$$

Notons que quels filtres passifs ne sont pas seulement connus pour obtenir une tension harmonique minimale ; mais, le choix du facteur de qualité élevé est nécessaire pour réduire les pertes de puissance.

### Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la solution permettant de réduire l'injection de courant non sinusoïdale, cette solution si le filtre passifs qui est le plus répandue depuis long temps, mais présentent les inconvénients suivants :

- Ø Résonance, encombrement, poids.
- Ø Ils ont grandes dimensions.
- Ø Les caractéristiques de compensation sont fixes.

Pour pallier ces inconvénients on passe au chapitre suivante pour présenter et étudier la méthode de filtrage active.

