

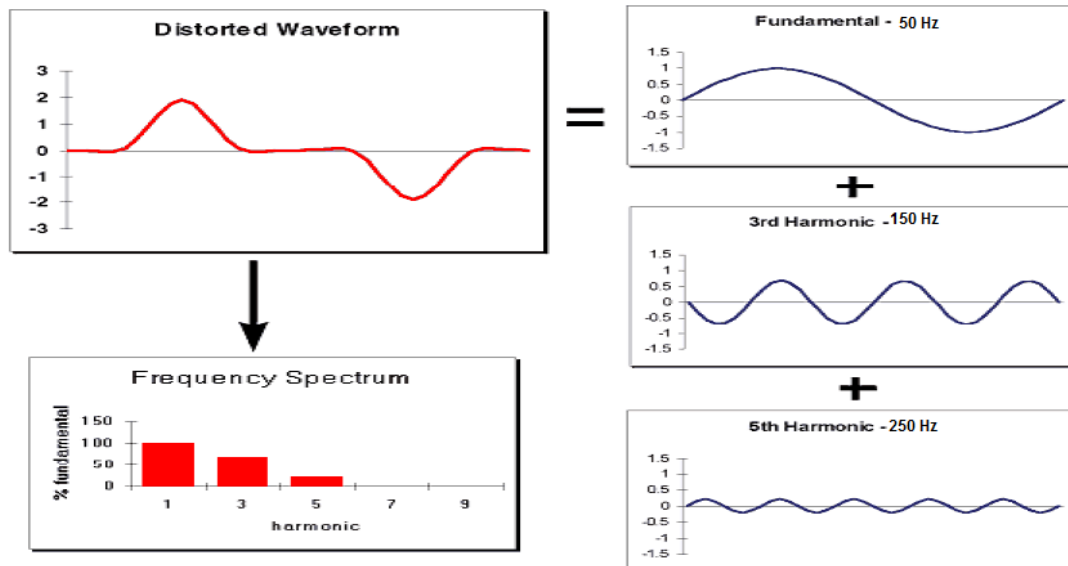
La pollution Harmonique (Chapitre 4 QEE)

Rappels Mathématiques: Décomposition en séries de Fourier d'un signal périodique

Un signal périodique de fréquence f peut s'écrire comme la somme de :

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

$$i(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n \geq 2} I_n \sin(n \omega t + \theta_n)$$
$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t + \phi_1) + \sum_{n \geq 2} V_n \sin(n \omega t + \phi_n)$$



Décomposition d'un signal périodique.

I. Introduction

Il existe dans le réseau des composantes causant l'apparition de courants et/ou tensions non-sinusoïdaux (apparition de courants harmoniques). On a qu'à penser aux convertisseurs en électronique de puissance (redresseur, onduleur, etc), aux fours à arcs, ou à tout autre charge non-linéaire.

Les charges non linéaires appellent du réseau un courant non purement sinusoïdal. Seul le fondamental à 50 Hz de ce courant déformé contribue, avec la tension, à l'apport de la puissance active consommée par l'équipement. Les charges non linéaires génèrent des harmoniques

Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation. La circulation de courants harmoniques dans les impédances du réseau crée ensuite des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation.

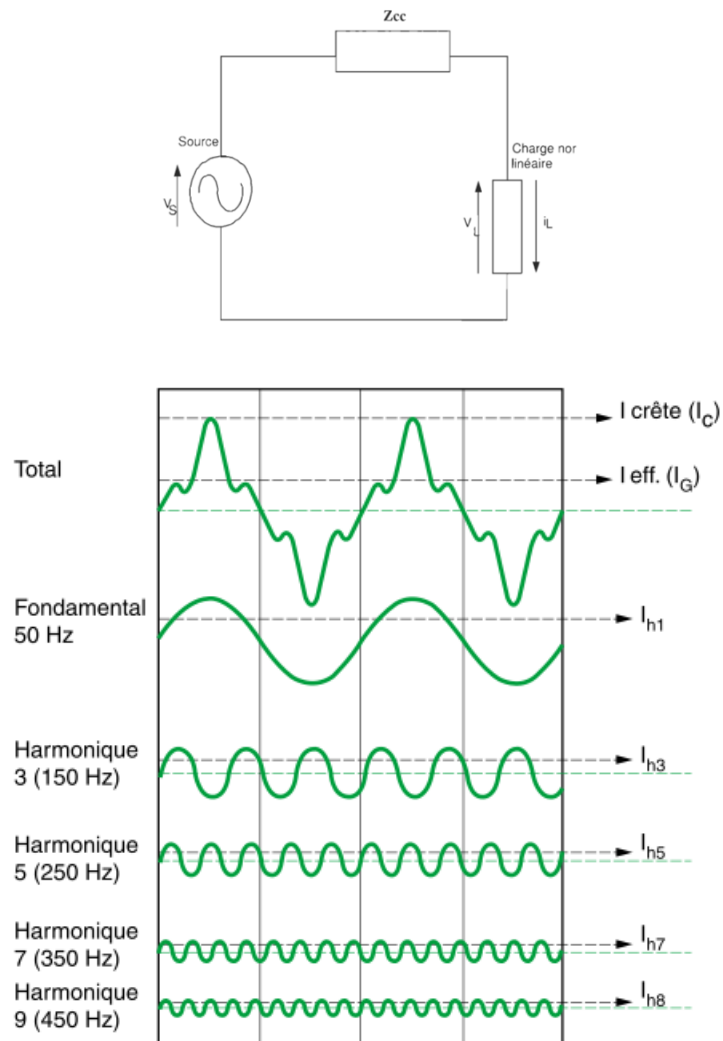


Figure. 1. Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9

$$v_s = V_s \sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$i_L(t) = i_{L_f}(t) + i_{L_h}(t)$$

$$i_{L_f}(t) = I_{L_f} \sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi_1)$$

$$i_{L_h}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} \sin[h(\omega t - \varphi_h)]$$

$$\omega = 2\pi f_0$$

avec :

f_0 : Fréquence du fondamental

V_s : Valeur efficace de la tension

I_{L_f} : Valeur efficace du fondamental du courant de charge

I_{L_h} : Valeur efficace de l'harmonique de rang h du courant de charge

φ_1 : Déphasage entre le fondamental du courant de charge et la tension

φ_h : Déphasage entre l'harmonique de rang h du courant de charge et la tension.

Les conséquences sur le système d'alimentation électrique deviennent préoccupantes du fait d'une utilisation croissante de ces équipements, mais aussi de l'application de l'électronique à presque toutes les charges électriques. En effet, une charge non linéaire appelle du réseau un courant important, déformé, décomposable en harmoniques. Les courants harmoniques ont des effets négatifs sur la quasi totalité des composantes du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques.

II. Les charges

Les courants harmoniques sont générés par les charges non-linéaires, c'est-à-dire, absorbant un courant n'ayant pas la même forme que la tension qui les alimente. Les charges de ce type les plus courantes sont celles à base de circuits redresseurs.

II-1. Charge non symétrique

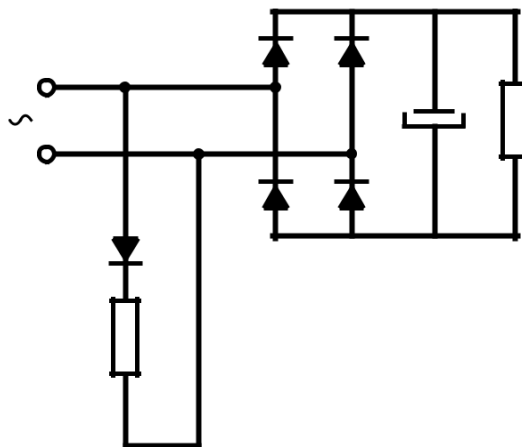


Figure. 2 : exemple de charge non linéaire quelconque (non symétrique).

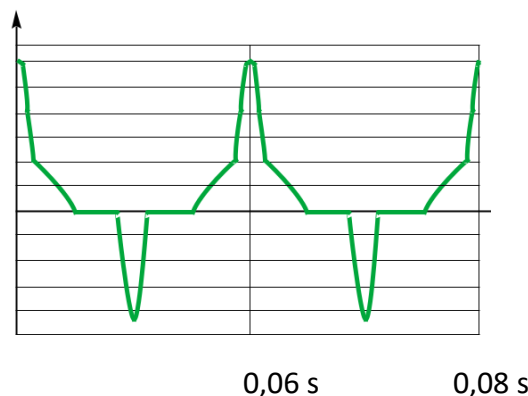


Figure. 3 : allure du courant absorbé.

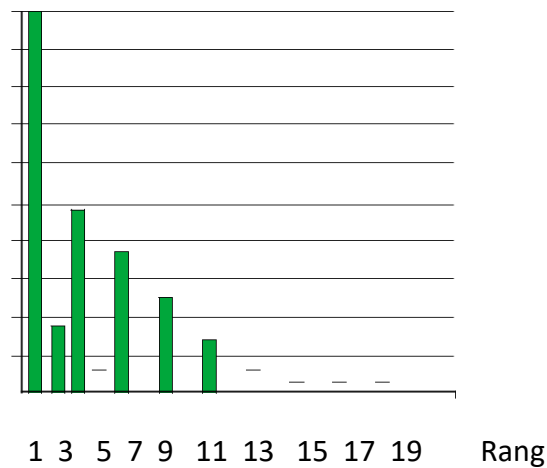


Figure. 4 : spectre du courant absorbé.

Une charge non-linéaire quelconque, comme celle représentée sur la figure 2, absorbe un courant qui contient tous les rangs d'harmoniques, pairs et impairs. L'allure du courant absorbé, dont les deux demi-alternances sont différentes, ainsi que son spectre harmonique sont représentés sur les figures 3 et 4.

II-2. Charges non linéaires symétriques

La plupart des charges connectées au réseau sont toutefois symétriques, c'est-à-dire que les demi-alternances de courant sont égales et opposées. Ceci peut s'exprimer mathématiquement par la relation :

$$f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$$

Dans ce cas, les harmoniques de rangs pairs sont nuls.

II-2.1 Charges triphasées

Considérons une charge triphasée non linéaire, équilibrée, symétrique, sans raccordement au neutre, comme représentée sur la figure 5.

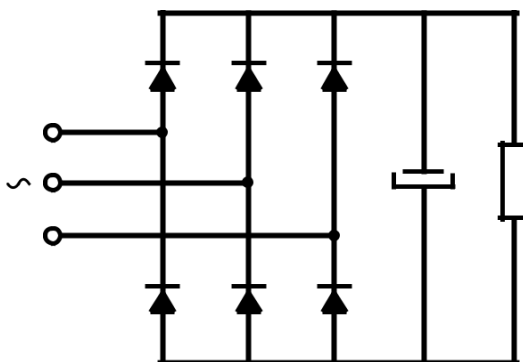


Figure. 5 : pont redresseur triphasé avec filtrage capacitif.

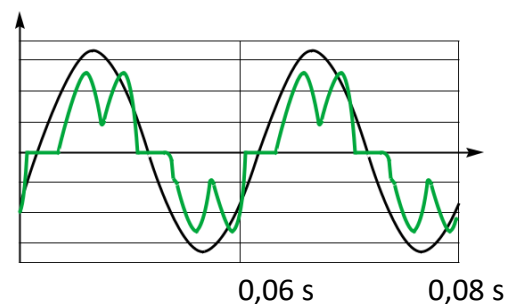


Figure. 6 : allure du courant absorbé par la charge

Supposons que les courants absorbés par cette charge contiennent de l'harmonique 3. Les courants harmoniques de rang 3 de chacune des phases peuvent s'écrire de la manière suivante :

$$i_{r3} = I_3 \sin 3\omega t$$

$$i_{s3} = I_3 \sin 3 \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) = I_3 \sin (3\omega t - 2\pi) = i_{r3}$$

$$i_{t3} = I_3 \sin 3 \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) = I_3 \sin (3\omega t - 4\pi) = i_{r3}$$

$$i_{r3} = i_{s3} = i_{t3}$$

Les courants harmoniques de rang 3 des trois phases sont donc égaux. Or, en l'absence de conducteur de neutre : $i_r + i_s + i_t = 0$.

La somme des courants harmoniques de rang 3, en particulier doit être nulle, ce qui n'est possible que si chacune des composantes est nulle.

Les charges triphasées, équilibrées, symétriques, ne génèrent donc pas d'harmonique de rang 3. Le raisonnement peut s'étendre à tous les harmoniques de rangs multiples de 3.

Les courants harmoniques non nuls sont donc de rang 5, 7, 11, 13, ..., c'est-à-dire de la forme $6k \pm 1$.

La démonstration peut être faite pour tout système comprenant des redresseurs commandés ou non. Il est ainsi démontré que le rang des harmoniques s'écrit $h = (n \times p) \pm 1$. Où n est un nombre entier (1, 2, 3, 4, 5,...) et p le nombre de redresseurs composant le dispositif.

Par exemple un circuit ne comprenant qu'un seul redresseur (redressement mono alternance) a des harmoniques de rang $n \pm 1$ et présente tous les harmoniques possibles en partant de 0 qui est le courant continu.

II-2.2 Charges monophasées

Rappelons que les charges symétriques ne génèrent pas d'harmoniques de rang pair (cf. paragraphe II.2). Le spectre étant en général décroissant, l'harmonique de rang 3 est donc l'harmonique prépondérant pour les charges monophasées. Ainsi, pour les charges très répandues de type redresseur monophasé à diodes avec filtrage capacitif (cf. figure. 7), l'harmonique de rang 3 peut atteindre 80 % du fondamental.

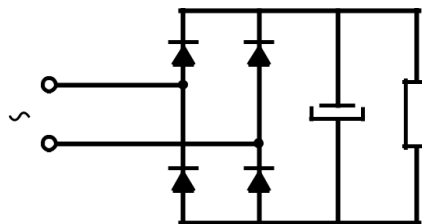


Figure. 7 : redresseur monophasé avec filtrage capacitif.

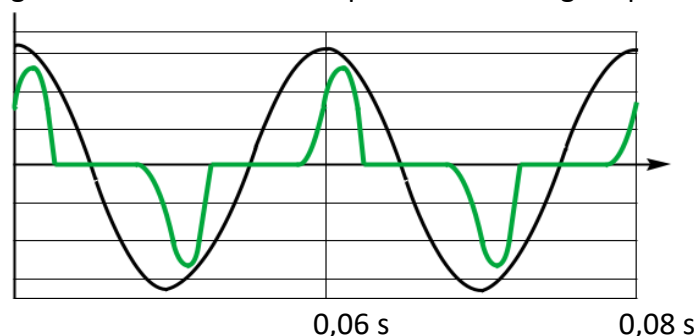


Figure. 8 : allure du courant absorbé par la charge.

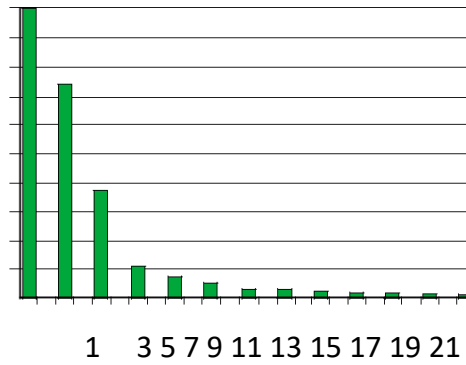


Figure. 9 : spectre harmonique du courant absorbé par la charge.

La forme de l'onde du courant qu'elles absorbent et son spectre harmonique sont représentés par les figures 8 et 9. De nombreux appareils, dans tous les domaines d'activités, comportent un circuit de ce type. Ce sont les principaux générateurs d'harmonique de rang 3.

III. Notions de tensions et courants harmoniques

III-1. Valeur efficace (True RMS)

Par définition, la valeur efficace d'un courant périodique $i(t)$ est : $I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 dt}$

On montre que

$$I_{eff} = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \sum_{n \geq 2} I_n^2}$$

De même

$$V_{eff} = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 + \sum_{n \geq 2} V_n^2}$$

III-2. Valeur efficace des harmoniques

Il s'agit de la valeur efficace de l'ensemble des harmoniques

On montre que

$$I_H = \sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}$$

et

$$V_H = \sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}$$

III-3. Total Harmonic Distorsion, THD (Taux de distorsion harmonique)

Les courants harmoniques circulant à travers les impédances du système électrique provoquent des baisses de tension harmonique, observées sous forme de distorsion harmonique en tension.

L'une des solutions destinées à détecter la présence d'harmoniques est le calcul du THD, taux de distorsion harmonique.

Définition du taux de distorsion harmonique: $THD = \frac{\text{valeur efficace des harmoniques}}{\text{valeur efficace du fondamental}}$

Ce qui nous donne

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{V_1}$$

et

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{I_1}$$

Remarque 1: Lorsque le THD est égal à zéro, on peut conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques sur le réseau.

Remarque 2: Il existe une autre définition du taux de distorsion se rapportant à la valeur efficace du signal dans sa globalité ($THD = \frac{\text{valeur efficace des harmoniques}}{\text{valeur efficace}}$, soit $THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{\sqrt{\sum_{n \geq 1} V_n^2}}$ pour la tension et $THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n \geq 1} I_n^2}}$ pour le courant). L'important est de rester cohérent dans ses calculs.

IV. Puissances en présence d'harmoniques

IV-1. Puissances actives, réactives et apparentes.

- La puissance active P consommée par la charge est la moyenne sur une période de la puissance instantanée :

$$P = \frac{1}{T} * \int_0^T v(t) * i(t) dt$$

On montre que :

$$P = V_0 \times I_0 + V_1 I_1 \cos \varphi_1 + V_2 I_2 \cos \varphi_2 + V_3 I_3 \cos \varphi_3 + \dots$$

contribution des composantes continues
contribution des fondamentales
contribution des harmoniques de rang 2
contribution des harmoniques de rang 3

- La puissance réactive Q consommée par la charge vaut

$$Q = V_1 I_1 \sin \varphi_1 + \sum_{n \geq 2} V_n I_n \sin \varphi_n$$

- La puissance apparente de la charge est par définition : $S = V \times I$

IV-2. Puissance déformante

En présence d'harmoniques, $S^2 \neq P^2 + Q^2$

On introduit la notion de puissance déformante D telle que

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

IV-3. Facteur de puissance

Par définition, le facteur de puissance vaut :

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Ce qu'il faut retenir :

Dans un milieu purement sinusoïdal : $PF = \cos \phi$
 Dans un milieu harmonique : $PF < \cos \phi$

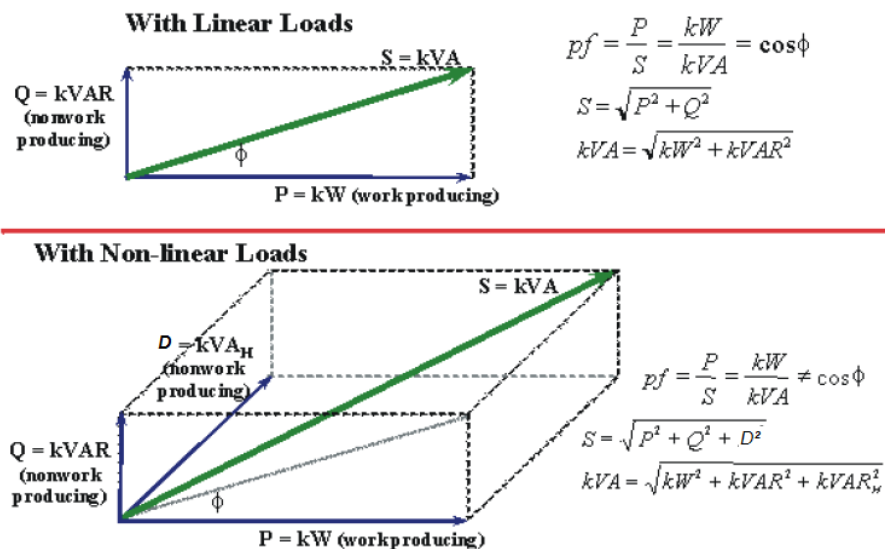


Figure. 10. Diagramme de puissance.

V. Cas d'un dipôle non linéaire alimenté par une tension alternative sinusoïdale

V-1. Expression de la tension et du courant

On suppose le courant alternatif : $i_0 = 0$

On a donc
$$I_{\text{eff}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n \geq 2} I_n^2} = I_1 \sqrt{1 + \sum_{n \geq 2} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

$$I_{\text{eff}} = I_1 \sqrt{1 + \text{THD}_I^2}$$

Une tension alternative purement sinusoïdale se résume à son fondamental (harmonique de rang 1).

Donc $V = V_1$ ($V_n = 0$ pour $n \geq 2$)

V-2. Expression des puissances

Les expressions de la tension et du courant permettent de simplifier celles des puissances

- Puissance active $P = V I_1 \cos \phi_1$
- Puissance réactive $Q = V I_1 \sin \phi_1$
- Puissance apparente $S = V I = V I_1 \sqrt{1 + \text{THD}_I^2}$
- Puissance déformante $D^2 = S^2 - (P^2 + Q^2)$
 $D = V I_1 \times \text{THD}_I$
 $D = V I_H$

Remarques:

- Les harmoniques du courant (rang ≥ 2) ne jouent aucun rôle en ce qui concerne la puissance active
- Les harmoniques du courant (rang ≥ 2) ne jouent aucun rôle en ce qui concerne la puissance réactive
- La puissance déformante est directement liée à la présence des harmoniques de courant (rang ≥ 2).

V-3. Expression du facteur de puissance

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{V I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{V^2 I_1^2 \cos^2 \varphi_1 + V^2 I_1^2 \sin^2 \varphi_1 + V^2 I_1^2 THD_1^2}}$$

$$PF = \frac{\cos \varphi_1}{\sqrt{1 + THD_1^2}}$$

Remarques:

- Quand le taux de distorsion harmonique du courant (THDi) augmente, le facteur de puissance diminue.
- Le terme $\cos \varphi_1$ est aussi appelé facteur de déplacement (DPF : Displacement Power Factor).

On a : $PF < DPF$

THDi	Facteur de puissance PF (pour DPF = 1)
0 % (charge linéaire)	1
10 %	0,995
20 %	0,981
50 %	0,894
100 %	0,707
150 %	0,555
200 %	0,447

Tableau 1. Facteur de puissance et THDi.

VI. Problèmes créés par les harmoniques

VI-1. Les effets

Effets immédiats : pertes par effet Joule

- Dégradation du facteur de puissance → Réduction de la puissance des moteurs (couple négatif)
- Surcharges des câbles, transformateurs et moteurs
- Augmentation du bruit dans les moteurs
- Erreur d'enregistrement dans les compteurs
- Surdimensionnement des câbles
- Réduction de la capacité du réseau
- Mauvais fonctionnement des contacteurs
- Perturbation des systèmes électroniques

Effets à moyen et long terme

- Réduction de la durée de vie des moteurs

- Détérioration des batteries de condensateurs
- Réduction de la durée de vie des transformateurs
- Vieillessement accéléré des isolants et des diélectriques
- Pertes Fer (Iron losses) , pertes créées par le champ magnétique + pertes dues aux courants de Foucault, entraînant un déclassement des transformateurs et des moteurs

VI-1-1. Extrait de la norme CEI 61000-2-2 :

Cette norme définit les niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence sur les réseaux publics d'alimentation basse tension

Harmoniques impairs				Harmoniques pairs	
Non multiples de 3		Multiples de 3			
Rang n	% du fondamental	Rang n	% du fondamental	Rang n	% du fondamental
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	$0,2 + 0,5 \times 25/n$	/	/	/	/

Tableau 2. Niveaux tolérables pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension 50 Hz (selon IEC61000-2-2).

VI-1-2.Prise en compte des courants harmoniques par la norme NF C 15-105 (extraits)

Le dimensionnement des câbles en fonction du pourcentage d'harmoniques (TH%) est réalisé suivant la norme NF C 15-100 éditée par l'UTE C 15-105 (433.3 & 433.4) en tenant compte du calcul de la section du neutre, suivant le taux d'harmoniques.

Taux d'harmoniques	Effets prévisibles
THDU < 5 % et THDI < 10 %	Néant
5 % < THDU < 8 % ou 10 % < THDI < 50 %	Pollution significative, effets nuisibles possibles
THDU > 8 % et THDI > 50 %	Pollution forte, dysfonctionnement probables
Taux d'harmoniques de rang 3 en courant > 15 %	Courant non négligeable dans le neutre

Tableau 3. Analyse prévisionnelle du taux de distorsion harmoniques en courant

VI-2. Les principaux remèdes envisagés

Solutions générales

- Abaisser les impédances harmoniques

	$0 < TH \leq 15 \%$	$15 \% < TH \leq 33 \%^{(1)}$	$TH > 33 \%^{(2)}$
Circuits monophasés	$S_{neutre} = S_{phase}$	$S_{neutre} = S_{phase}$	$S_{neutre} = S_{phase}$
Circuits triphasés+neutre Câbles multipolaires $S_{phase} \leq 16 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ ou $25 \text{ mm}^2 \text{ Alu}$	$S_{neutre} = S_{phase}$	$S_{neutre} = S_{phase}$ Facteur 0,84	$S_{phase} = S_{neutre}$ S_{neutre} déterminante $I_{Bneutre} = 1,45 \cdot I_{Bphase}$ Facteur 0,84
Circuits triphasés+neutre Câbles multipolaires $S_{phase} > 16 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ ou $25 \text{ mm}^2 \text{ Alu}$	$S_{neutre} = S_{phase}/2$ admis Neutre protégé	$S_{neutre} = S_{phase}$ Facteur 0,84	$S_{phase} = S_{neutre}$ S_{neutre} déterminante $I_{Bneutre} = 1,45 \cdot I_{Bphase}$ Facteur 0,84
Circuits triphasés+neutre Câbles unipolaires $S_{phase} > 16 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$ ou $25 \text{ mm}^2 \text{ Alu}$	$S_{neutre} = S_{phase}/2$ admis Neutre protégé	$S_{neutre} = S_{phase}$ Facteur 0,84	$S_{neutre} > S_{phase}$ $I_{Bneutre} = 1,45 \cdot I_{Bphase}$ Facteur 0,84
(1) circuits d'éclairage alimentant des lampes à décharge dont les tubes fluorescents dans des bureaux, ateliers, grandes surfaces, etc. (2) circuits dédiés à la bureautique, l'informatique, appareils électroniques dans des immeubles de bureaux, centres de calcul, banques, salles de marché, magasins spécialisés, etc.			

Tableau 2. Choix de la section du neutre selon NF C 15-105

- Agir sur la structure de l'installation (Filtrage)

VII- Détection et atténuation des harmoniques

VII-1. Pourquoi détecter les harmoniques et les combattre?

VII-1.1. Les perturbations dues aux harmoniques

Les harmoniques circulant dans les réseaux détériorent la qualité de l'énergie, et sont ainsi à l'origine de nombreuses nuisances :

- surcharge des réseaux de distribution par l'augmentation du courant actif/efficace,
- surcharge des conducteurs de neutre en raison de la sommation des harmoniques de rang 3 créés par les charges monophasées,
- surcharge, vibrations et vieillissement des alternateurs, transformateurs, moteurs, ronflement des transformateurs,
- surcharge et vieillissement des condensateurs de compensation d'énergie réactive,
- déformation de la tension d'alimentation pouvant perturber des récepteurs sensibles,
- perturbation des réseaux de communication ou des lignes téléphoniques.

VII-1.2. Un impact économique important

Pertes énergétiques

Les courants harmoniques provoquent dans les conducteurs et équipements des pertes supplémentaires par effet Joule.

Surcoût d'abonnement

La présence de courants harmoniques nécessite d'augmenter le niveau de puissance souscrite, et le coût de l'abonnement. De plus, les distributeurs d'énergie auront de plus en plus tendance à pénaliser les producteurs

d'harmoniques.

Surdimensionnement des matériels

- Le déclasserement des sources d'énergie (générateurs, transformateurs et onduleurs) nécessite leur surdimensionnement.
- Les conducteurs doivent être dimensionnés de façon à permettre la circulation des courants harmoniques. Comme les fréquences de ces harmoniques sont plus élevées que celle du fondamental, les impédances inductives vues par ces courants sont plus élevées ; pour éviter des pertes par effet Joule trop importantes, il est nécessaire de surdimensionner les conducteurs.
- La circulation de courants harmoniques dans le conducteur de neutre nécessite son surdimensionnement.

Réduction de la durée de vie des matériels

Lorsque la tension d'alimentation présente un taux de distorsion voisin de 10 %, la durée de vie des appareils est réduite de manière sensible ; estimée à :

- 30 % pour les machines monophasées,
- 15 % pour les machines triphasées,
- 5 % pour les transformateurs.

Déclenchements intempestifs et arrêts d'installation

Les disjoncteurs d'une installation sont soumis à des pointes de courant dues aux harmoniques. Ces pointes de courants peuvent provoquer des déclenchements intempestifs, et induire des pertes de production ainsi que des coûts liés au temps de remise en marche de l'installation.

VII-1.3. Quelques exemples

Comme le montrent les exemples cités ci-dessous, ce sont les conséquences économiques de la présence des harmoniques qui a conduit à la mise en œuvre de filtres d'harmoniques.

Centre de calcul d'une compagnie d'assurances

Dans ce centre de calcul, le déclenchement intempestif d'un disjoncteur occasionnait une perte estimée à 100 000 euros par heure de coupure.

Laboratoire pharmaceutique

Les harmoniques ont provoqué la défaillance d'un groupe électrogène, et l'interruption d'une phase de test de longue durée sur un nouveau médicament ; la conséquence est une perte estimée à 17 millions d'euros.

Usine métallurgique

Des fours à induction ont provoqué la surcharge et la destruction de trois transformateurs de 1500 et 2500 kVA en un an et des coûts d'arrêts de production estimés à 20 000 euros par heure.

Fabrication de meubles de jardin

La défaillance de plusieurs variateurs a provoqué des arrêts de production chiffrés à 10 000 euros par heure.

VII-1.4. Des conséquences de plus en plus importantes

Le phénomène des harmoniques était encore peu considéré il y a seulement dix ans, car leurs effets sur les réseaux étaient généralement peu importants. Mais l'arrivée en force de l'électronique de puissance dans les récepteurs a amplifié fortement le phénomène dans tous les secteurs d'activité.

Les harmoniques sont d'autant plus difficiles à combattre que les équipements vitaux pour

l'entreprise sont souvent les responsables de la génération des perturbations.

VII-1.5. En pratique, quels harmoniques mesurer et combattre ?

Les harmoniques les plus fréquemment rencontrés dans le cas des réseaux triphasés sont les harmoniques de rangs impairs. L'amplitude des harmoniques décroît normalement avec la fréquence. Au-delà du rang 50, les courants harmoniques sont négligeables et leur mesure n'est plus significative. Ainsi, une bonne précision de mesure est obtenue en considérant les harmoniques jusqu'au rang 30. Les distributeurs d'énergie surveillent les harmoniques de rangs 3, 5, 7, 11 et 13.

Pratiquement, la compensation des harmoniques des rangs les plus bas (jusqu'au rang 13) est généralement suffisante. Une bonne compensation prendra également en compte les harmoniques jusqu'au rang 25.

VII-2. Les principaux effets des harmoniques dans les installations

VII-2.1 Phénomène de résonance

L'association sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs entraîne l'apparition de phénomènes de résonance. Ceux-ci se manifestent par des valeurs extrêmement élevées ou extrêmement faibles des impédances. Ces variations d'impédance vont modifier les courants et tensions présents sur le réseau.

Dans ce paragraphe, seuls sont abordés les phénomènes de type résonance parallèle, les plus fréquents.

Considérons le schéma simplifié suivant (Figure. 11), représentant une installation comprenant :

- un transformateur d'alimentation,
- des charges linéaires,
- des charges non-linéaires génératrices de courants harmoniques,
- des condensateurs de compensation.

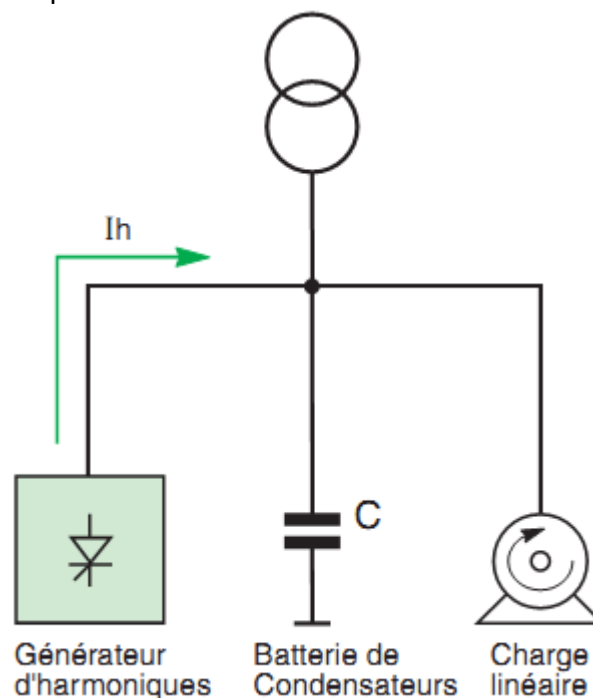


Figure 11.

Pour une analyse harmonique, le schéma équivalent est le suivant (Figure. 12) :

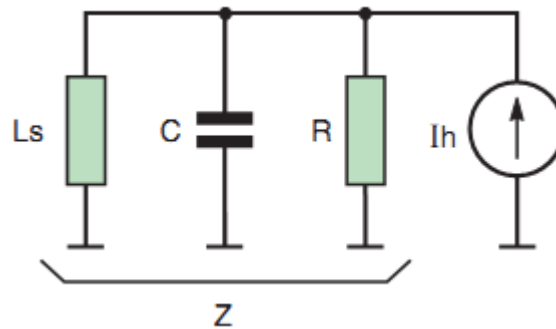


Figure 12.

L'impédance Z vaut :

$$Z = \frac{jLs\omega}{1-LsC\omega^2}$$

en négligeant R, où

Ls = Inductance de l'alimentation (réseau + transformateur + ligne)

C = Capacité des condensateurs de compensation

R = Résistance des charges linéaires

Ih = Courant harmonique de rang h

Il y a résonance lorsque le dénominateur $1-LsC\omega^2$ tend vers zéro. La fréquence correspondante est alors appelée fréquence de résonance du circuit. A cette fréquence, l'impédance aura sa valeur maximale. Il y a donc une apparition de tensions harmoniques importantes et donc une forte distorsion de tension. Ces distorsions de tensions s'accompagnent de circulations de courants harmoniques dans le circuit Ls + C supérieurs aux courants harmoniques injectés.

Le réseau d'alimentation ainsi que les condensateurs de compensation sont soumis à des courants harmoniques importants et donc à des risques de surcharge. Pour éviter le phénomène de résonance, la solution consiste à ajouter des bobines anti-harmoniques en série avec les condensateurs.

VII-2.2 Augmentation des pertes

-Pertes dans les conducteurs

La puissance active transmise à une charge est fonction du courant fondamental. Lorsque le courant absorbé par la charge contient des harmoniques, la valeur efficace de ce courant, I_{eff} , est supérieure au fondamental I_1 .

La définition du THD donne :

$$THD = \sqrt{\left(\frac{I_{eff}}{I_1}\right)^2 - 1}$$

$$\text{d'où : } I_{eff} = I_1 \sqrt{1+THD^2}$$

Sur la Figure 13 ont été représentés, en fonction du taux de distorsion harmonique :

- l'accroissement du courant efficace I_{eff} pour une charge absorbant un courant fondamental donné,
- l'accroissement des pertes Joule PJ, sans tenir compte de l'effet de peau (Sur le graphique, la référence 1 pour I_{eff} et PJ correspond à l'absence d'harmonique).

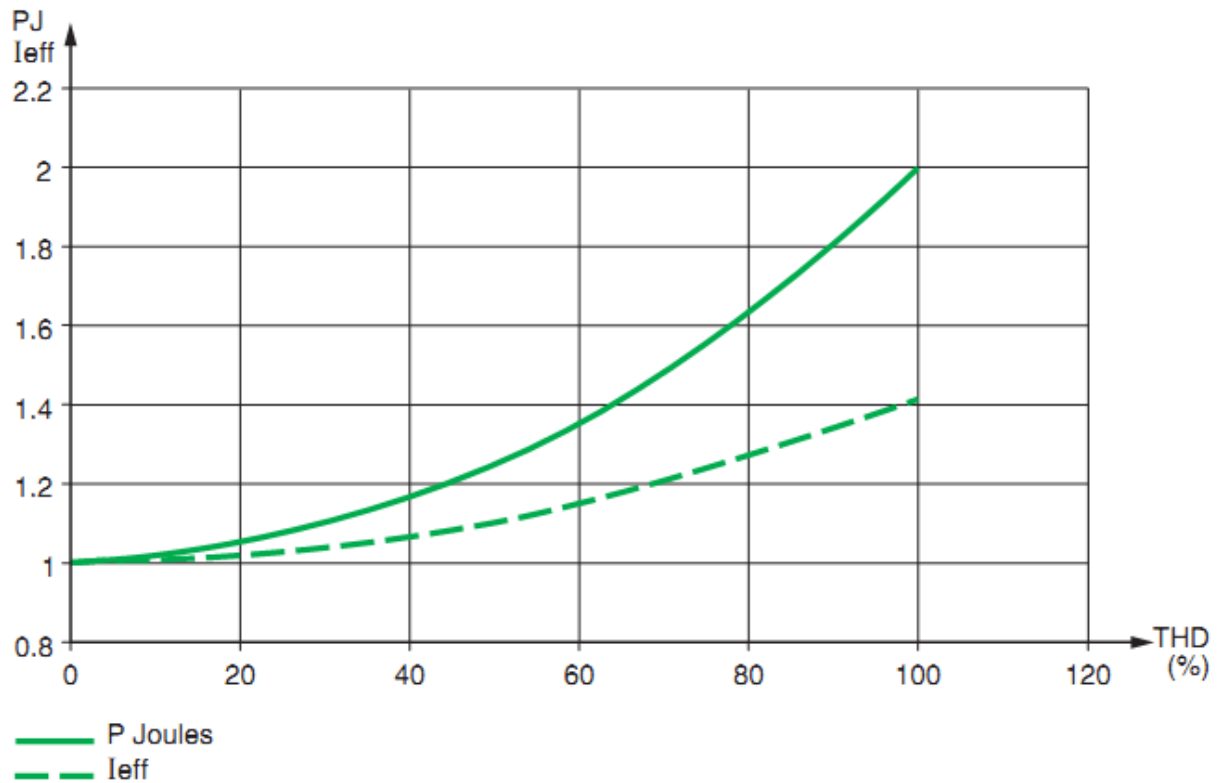


Figure 13. Evolution du courant efficace et des pertes Joule en fonction de la valeur du THD.

Les courants harmoniques provoquent donc une augmentation des pertes Joule dans tous les conducteurs qu'ils parcourent et un échauffement supplémentaire dans les transformateurs, appareillages, câbles...

-Pertes dans les machines asynchrones

Les tensions harmoniques de rang h appliquées aux machines asynchrones provoquent la circulation dans le rotor de courants de fréquences supérieures à 50 Hz, responsables de pertes supplémentaires.

-Pertes dans les transformateurs

Les courants harmoniques circulant dans les transformateurs provoquent une augmentation des "pertes cuivre" par effet Joule et des "pertes fer" par courants de Foucault. Les tensions harmoniques sont responsables de pertes fer par hystérésis.

Les pertes dans les bobinages varient comme le carré du THDi, et les pertes dans le noyau linéairement en fonction du THDu.

Dans les transformateurs de distribution publique, où les taux de distorsion sont limités, les pertes augmentent de 10 à 15 %.

-Pertes dans les condensateurs

Les tensions harmoniques appliquées aux condensateurs provoquent la circulation de courants proportionnels à la fréquence des harmoniques. Ces courants sont responsables de pertes supplémentaires.

VII-2.3 Surcharge des matériels

-Alternateurs

Les alternateurs alimentant des charges non-linéaires doivent être déclassés en raison des pertes supplémentaires créées par les courants harmoniques. Ce déclassement est de l'ordre de 10 % pour un alternateur alimentant 30 % de charges non-linéaires, d'où la nécessité de surdimensionner l'appareil.

-Onduleurs

Le courant absorbé par du matériel informatique présente un facteur de crête élevé, aussi un onduleur dimensionné sur la seule valeur de courant efficace risque de ne pas pouvoir fournir la crête de courant nécessaire et de se trouver en surcharge.

-Transformateurs

La courbe suivante (Figure. 14) donne le déclassement typique à appliquer à un transformateur alimentant des charges électroniques.

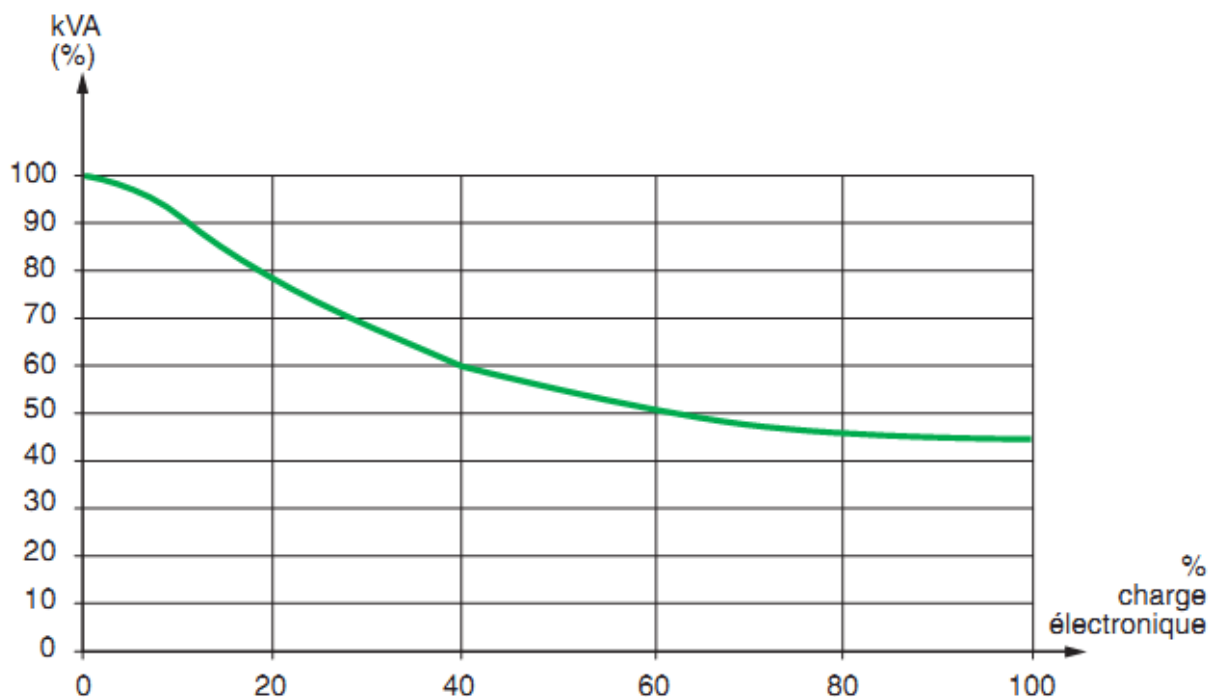


Figure. 14 : Taux de déclassement à appliquer à un transformateur alimentant des charges Electroniques.

- Machine synchrone
- Condensateurs
- ...

VII-3 Les solutions pour atténuer les harmoniques

Les solutions possibles pour atténuer les effets des harmoniques sont de trois natures différentes :

- adaptations de l'installation,
- utilisation de dispositifs particuliers dans l'alimentation,
- filtrage.

-Positionner les charges polluantes en amont du réseau

-Regrouper les charges polluantes

-Séparer les sources

-Utiliser des transformateurs à couplages particuliers

-Placer des inductances dans l'installation

-Choisir un schéma de liaison à la terre adapté

VII-3.1 Filtrage des harmoniques

Dans le cas où les actions préventives ci-dessus sont insuffisantes, il est nécessaire d'équiper l'installation polluée de dispositif de filtrage. Il existe trois types de filtres :

- le filtre passif,
- le filtre actif,
- le filtre hybride.

VII-3.1.1. Filtre passif

Applications typiques

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges

Principe de fonctionnement

Un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, est placé en parallèle sur le générateur d'harmoniques (Figure. 15). Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation.

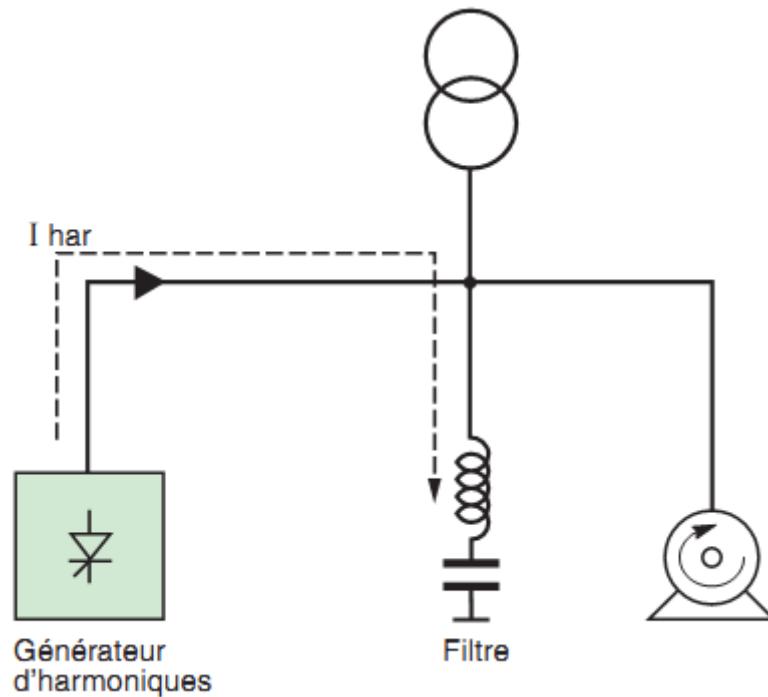


Figure 15. Filtrage passif.

En général, le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique proche de l'harmonique à éliminer. Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsque l'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs.

VII-3.1.2. Filtre actif (ou compensateur actif)

Applications typiques

- Installations tertiaires avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200 kVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, bureautique...).
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges

Principe de fonctionnement

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non-linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge. La Figure 16 donne un exemple de filtre actif parallèle compensant le courant harmonique ($I_{har} = -I_{act}$).

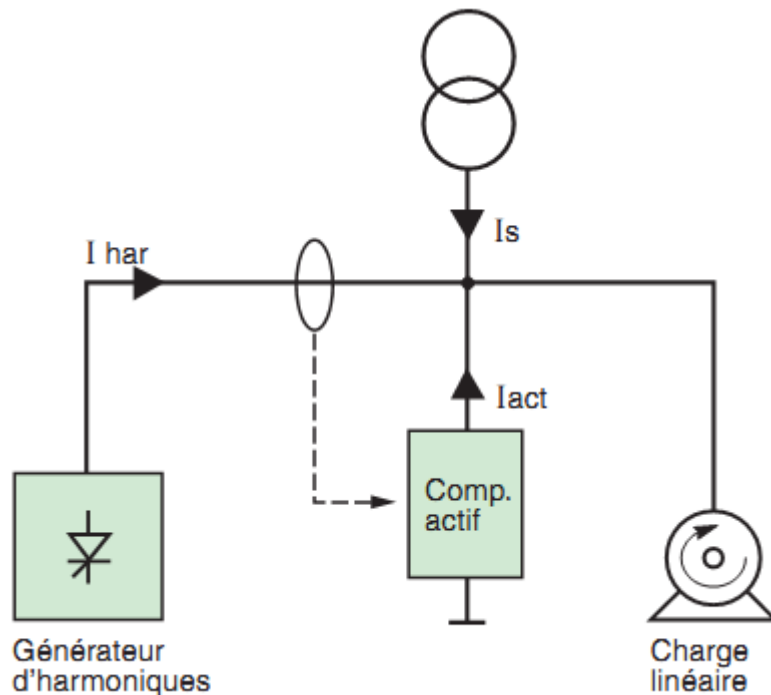


Figure 16. Filtrage actif.

Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne I_s soit sinusoïdal.

VII-3.1.3. Filtre hybride

Applications typiques

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.
- Recherche de conformité à des limites strictes d'émission harmonique.

Principe de fonctionnement

Les deux types de dispositifs précédents peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride (Figure. 17). Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

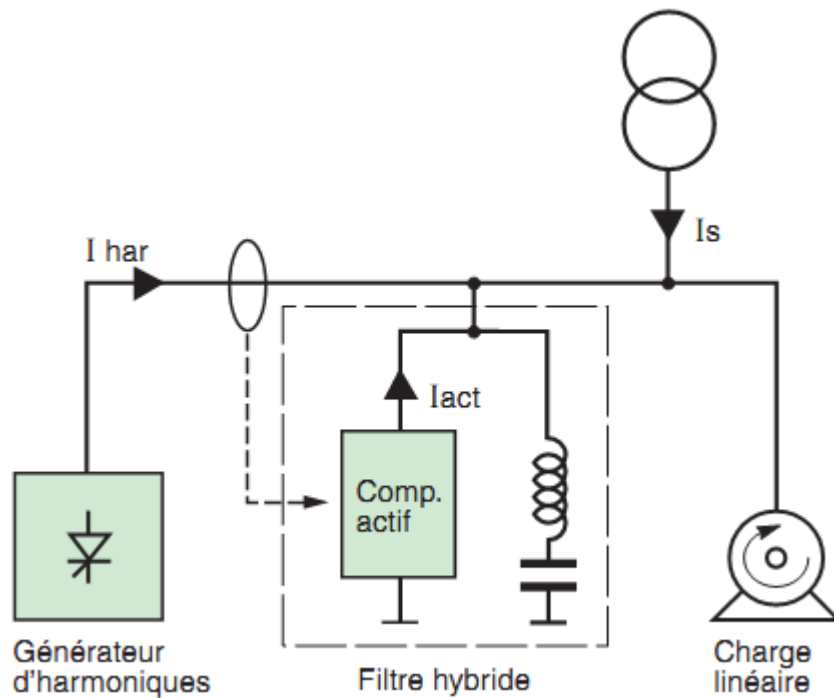


Figure 17. Filtrage hybride.

VII-3.1.4. Critères de choix

Le filtre passif permet à la fois la compensation d'énergie réactive et une grande capacité de filtrage en courant.

Le filtre passif réduit aussi les tensions harmoniques des installations dont la tension d'alimentation est polluée. Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les périodes de faible charge.

L'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.

Le compensateur actif permet le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge. Cependant, sa puissance harmonique est limitée.

Le filtre hybride réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs.

Source bibliographique : Schneider Electric