Qualité de transmission d'énergie électrique

I. Introduction

La transmission d'énergie électrique utilise tension et courant dans les lignes, mais des perturbations surviennent à cause de charges non linéaires comme les variateurs de vitesse utilisés par les industriels, impactant le réseau.

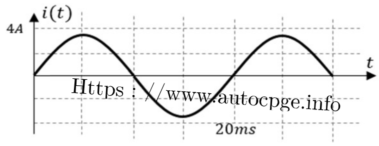


Figure 1

Un réseau de transmission est considéré comme idéal lorsqu'à la fois la tension et le courant adoptent une forme sinusoïdale (figure1). En revanche, s'ils présentent des formes différentes, le réseau est alors perturbé et **contient des harmoniques** (figure 2).

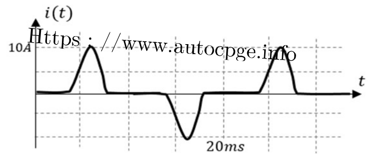


Figure 2

II. Représentation spectrale des signaux électriques

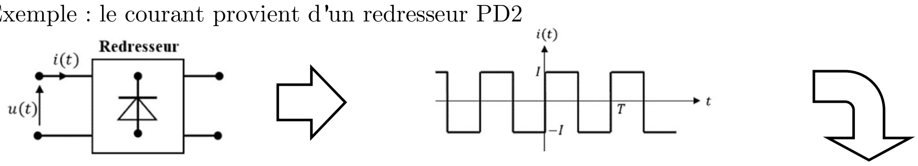
1. Série de fourrier d'une fonction périodique

Joseph Fourier a démontré que tout signal, qu'il soit électrique ou non, et périodique peut toujours être décomposé en une somme infinie de composantes sinusoïdales : la série de Fourier

Propriété : Toute fonction $\boldsymbol{s(t)}$ périodique de période T (fréquence $f = \frac{1}{T}$) peut se mettre sous la forme :

$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{+\infty} a_n \cos(n.\omega\, t) + b_n \sin(n.\omega\, t)$		
$a_0 = \frac{1}{T}\int_0^T s(t)\, dt$	$a_n = \frac{2}{T}\int_0^T s(t).\cos(n.\omega\, t)\, dt$	$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T s(t).\sin(n.\omega\, t)\, dt$

Exemple : le courant provient d'un redresseur PD2

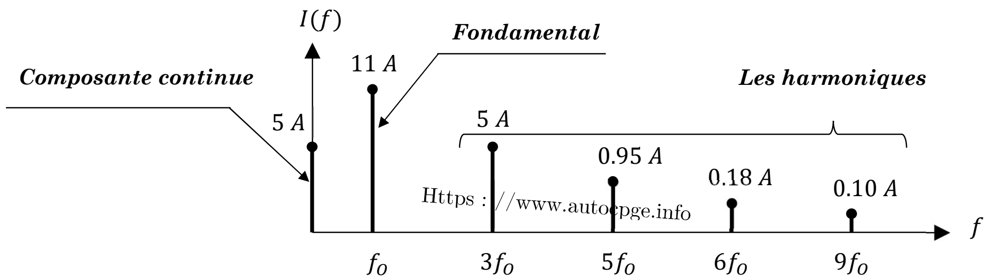


$a_0 = 0$	$a_n = 0$	$b_n = \frac{2\,I}{n\,\pi}(1-\cos(n\,\pi))$ ➔ si n paire $bn = 0$ si n impaire $bn = \frac{4\,I}{n\,\pi}$ ➔ $n = 2k+1$
$\boldsymbol{i(t) = \frac{4\,I}{\pi}\sum_{n=1}^{+\infty}\frac{1}{2k+1}\ \sin((2k+1).\omega\, t)}$		

2. Représentation fréquentielle : la notion de spectre

Une représentation temporelle ne permet pas de fournir les détails d'un signal. En revanche, le spectre d'un signal est une représentation dans le domaine fréquentiel où l'on attribue une amplitude à chaque fréquence correspondante. Cela permet d'obtenir une vue plus complète et détaillée des différentes fréquences présentes dans le signal.

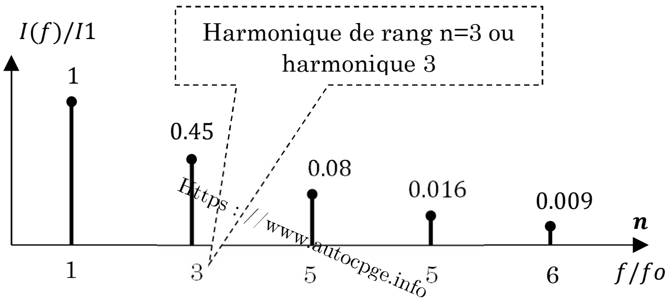
Exemple : $i(t) = 5 + 11\sin(\omega\, t) + 5\sin(3.\omega\, t) + 0.95\ \sin(5.\omega\, t) + 0.18\ \sin(7.\omega\, t) + 0.10\ \sin(9.\omega\, t)$ avec $\omega = 2\pi\, fo$



- **Composante continue :** La partie constante d'un signal se trouve à une fréquence de f=0 Hz.
- **Fondamentale :** La composante souhaitée qui représente une grande portion du signal et a toujours la fréquence principale fo.
- **Harmoniques** : Les composantes non souhaitées dans un réseau, réduisant l'efficacité de transmission, le rendement et la durée de vie d'un système et dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence principale fo.

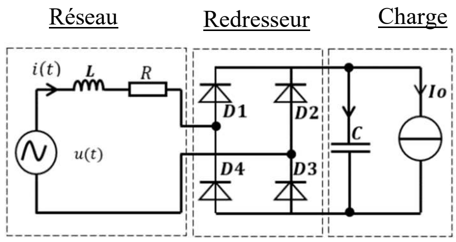
3. Représentation fréquentielle : spectre normalisé

Pour obtenir le spectre normalisé, on divise les tensions des harmoniques par la tension du fondamental et aussi même opération aux fréquences. Cela permet de mettre toutes les harmoniques à l'échelle du fondamental dans la représentation spectrale.

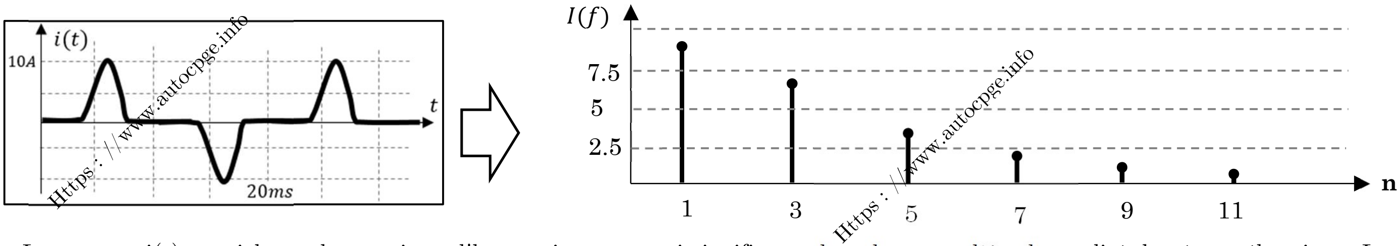


III. Pollution d'harmonique

1. Définition



Une perturbation harmonique est définie comme une déformation de la forme d'onde d'un signal sinusoïdal pur (le courant i(t) ici). Sur le réseau électrique, les perturbations de la forme d'onde sont principalement dues à la présence de charges non linéaires (redresseur ici).



Le courant i(t) est riche en harmonique d'harmoniques, ce qui signifie que le redresseur altère la qualité du réseau électrique. Le THD (Taux de Harmonique de Distorsion) est un indicateur permettant d'évaluer l'efficacité de la transmission d'énergie.

2. Valeur efficace de signal déformé : le courant i(t)

En théorie, pour déterminer le taux de distorsion harmonique, on doit d'abord calculer la valeur efficace du courant global ainsi que le courant fondamental i1(t).

2.1. L'expression du courant i(t)

A partir du spectre, le courant i(t) s'écrit par :

$$\mathbf{i(t)= 9.5\ sin(\omega\ t\ )+7\ sin(3\ \omega\ t\ )+3\ sin(5\ \omega\ t\ )+2.3\ sin(7\ \omega\ t\ )+1.25\ sin(9\ \omega\ t\ )+1\ sin(11\ \omega\ t\ )}$$

2.2. La valeur efficace du fondamental i1(t)

Expression du fondamental i1(t)	Valeur efficace du fondamental I1
$\boldsymbol{i_1}\mathbf{(t)= 9.5\ sin(\omega\ t\ )}$	$I_1 = \frac{I_{1\ Max}}{\sqrt{2}} = \frac{9.5}{\sqrt{2}}$ => $I_1 = 6.71A$

2.3. Valeur efficace du courant i(t) noté I

Si la série de fourrier de s(t) est :

$$s(t) = Smoy + S_{1\,max}\sin(\omega.t - \varphi 1) + S_{2\,max}\sin(2.\omega.t - \varphi 2) + S_{3\,max}\sin(3.\omega.t - \varphi 3) + \ldots + S_{n\,max}\sin(n.\omega.t - \varphi n)$$

La valeur efficace est alors exprimée par :

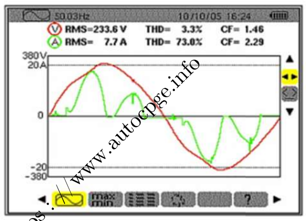
$$S_{eff} = \sqrt{(Smoy)^2 + (S_{1\ eff})^2 + (S_{2\,eff})^2 + (S_{3\ eff})^2 + \ldots + (S_{n\ eff})^2} \quad \text{Avec} \quad S_{k\ eff} = \frac{S_{k\ max}}{\sqrt{2}}$$

La valeur efficace de courant i(t) :

$$I = \sqrt{\left(\frac{I_{1\ Max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{3\ Max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{5\ Max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{7\ Max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{9\ Max}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{I_{11\ Max}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

$$\Rightarrow \quad I = \sqrt{\left(\frac{9.5}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{7}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{2.3}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{1.25}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{I = 8.83\ A}$$

3. Taux de distorsion harmonique THD



Le calcul du THD, ou taux de distorsion harmonique, est une méthode utilisée pour identifier la présence d'harmoniques. Un THD égal à zéro permet de conclure qu'il n'y a pas d'harmoniques présentes sur le réseau électrique.

Taux de distorsion harmonique s'exprime par :

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{+\infty}(I_i)^2}{{I_1}^2}} = \sqrt{\frac{I^2 - {I_1}^2}{{I_1}^2}}$$ Avec :

- I_1 : la valeur efficace du fondamental de i(t)
- I : la valeur efficace du courant i(t)

Dans notre situation de courant, Le taux de distorsion harmonique est :

On a :

$\mathrm{THD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^{+\infty}(I_i)^2}{{I_1}^2}} = \sqrt{\frac{I^2 - {I_1}^2}{{I_1}^2}} \Rightarrow \mathrm{THD} = 85.5\ \%$ D'ou le courant i(t) est très riche en harmoniques

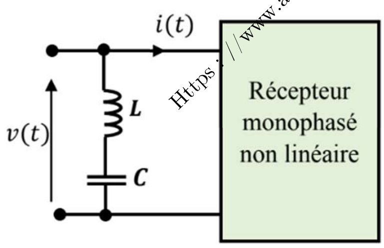
4. Effet de la pollution d'harmonique

La présence des harmoniques du courant absorbé par des charges non linéaires provoque les effets suivant :

- Diminution du facteur de puissance fp (à cause de la puissance D).
- Augmentation des pertes Joule dans la ligne de distribution ($\boldsymbol{R_{ligne}\, I^2}$) .
- Le vieillissement de l'isolement des composants du réseau et, en conséquence, la réduction de l'énergie
- Création de courants homopolaires dans la ligne neutre (courant de neutre non nul).

5. Filtre anti-harmonique

Les filtres anti-harmoniques constituent la solution la plus complète pour résoudre les problèmes de qualité causés par les harmoniques, tant dans des installations industrielles que commerciales ou de services.



L'objectif est d'éliminer les harmoniques perturbateurs, généralement les harmoniques d'ordre 3 et leurs multiples. Pour cela, on recherche les valeurs appropriées de L et C, lesquelles sont déterminées en suivant la méthode suivante :

On désire supprimer l'harmonique d'ordre n alors : $\underline{U_n} = \underline{Z_n}.\underline{I_n} = 0$

$\underline{Z_n} = 0 \rightarrow jL.n.\omega + \frac{1}{jC\,n\,\omega} = 0$

Alors la relation pour calculer L et C :

$\boldsymbol{L_n\, C_n = \frac{1}{(n.2\pi.f)^2}}$ avec :

- $\boldsymbol{f}$: La fréquence de réseau de distribution.
- $\boldsymbol{n}$: L'harmonique à supprimer

Question : Dans notre situation de courant, déterminez la valeur de L nécessaire pour éliminer l'harmonique d'ordre 3.

On cherche la valeur de L pour supprimer l'harmonique n = 3 :

On a: $\mathrm{L_3\, C_3} = \frac{1}{(3.2\pi.f)^2}$

⇨ $\mathrm{L_3} = \frac{1}{\mathrm{C_3}\,(6\,\pi.f)^2}$

⇨ Si $\mathrm{C_3} = 1\ \mathrm{mF}$, donc $\mathrm{L_3} = 1.12\ \mathrm{mH}$