LES HARMONIQUES

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Les courants harmoniques sont générés par les charges non-linéaires.

Ces courants apparaissent en raison d'un comportement non sinusoïdal sous une tension, elle, sinusoïdale.

Ces charges non-linéaires peuvent être de type symétrique ou non symétrique.

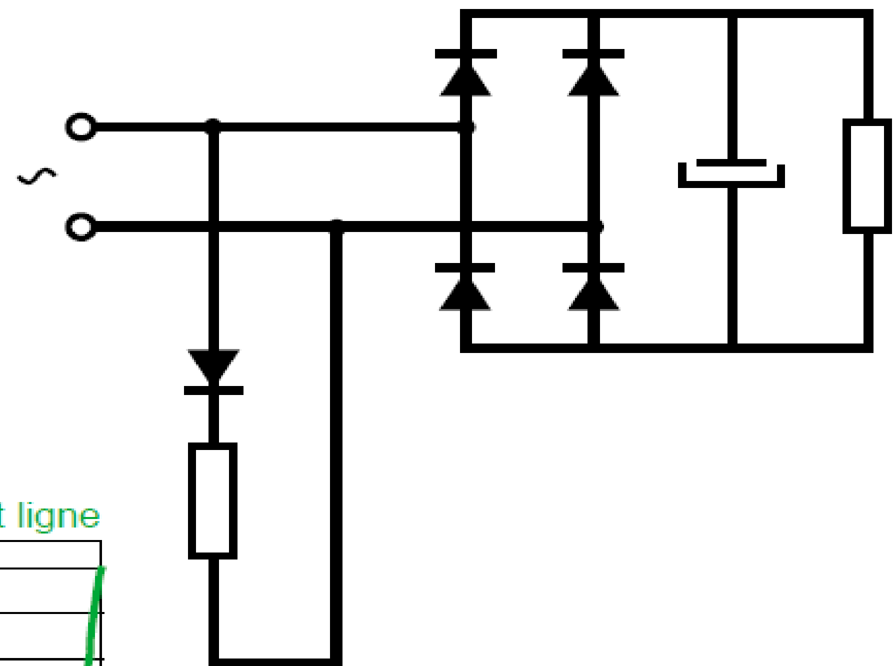
Les charges non-symétriques sont le siège d'un courant non symétrique.

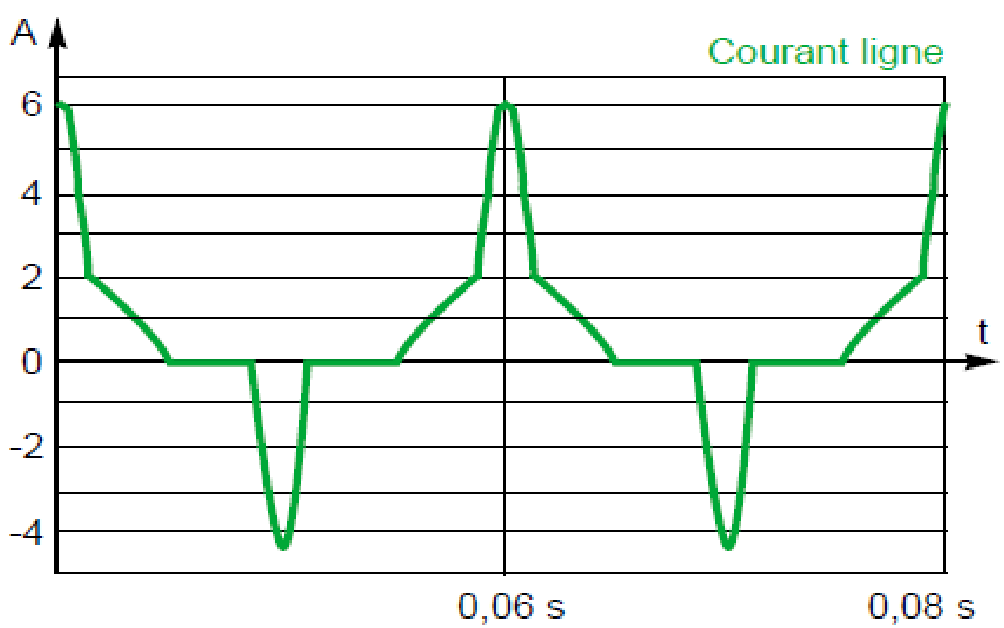
Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges non symétriques :

Le circuit ci-après est non symétrique, les alternances ne le sont donc pas.

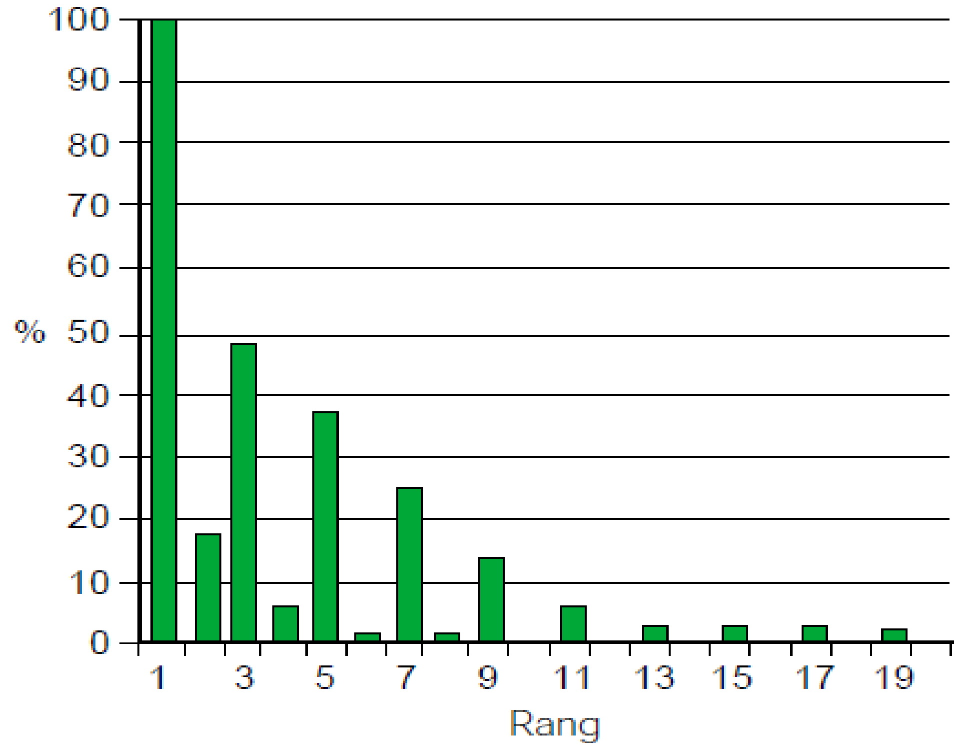




Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Le spectre présente des courants se fréquences multiples de celle du courant fondamental. Ces fréquences se manifestent pour des courants d'amplitudes variables.



Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges symétriques :

Il faut noter que la plupart des charges non linéaires sont symétriques ; les demi-alternances positives et négatives sont égales et opposées. D'où l'expression :

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

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges symétriques :

Cas des harmoniques de rang pair (exemple 2):

$$i(\omega t) = I_1.\sin(\omega t) + I_2.\sin(2\omega t)$$

$$i(\omega t+\pi) = I_1.\sin(\omega t+\pi) + I_2.\sin2(\omega t+\pi)$$

$$i(\omega t+\pi) = -I_1.\sin(\omega t) + I_2.\sin(2\omega t) = -i(\omega t)$$

Ceci ne peut être vrai que si $I_2 = 0$; ce raisonnement peut être étendu au rangs multiples de 2.

D'où les harmoniques de rangs pairs sont annulés.

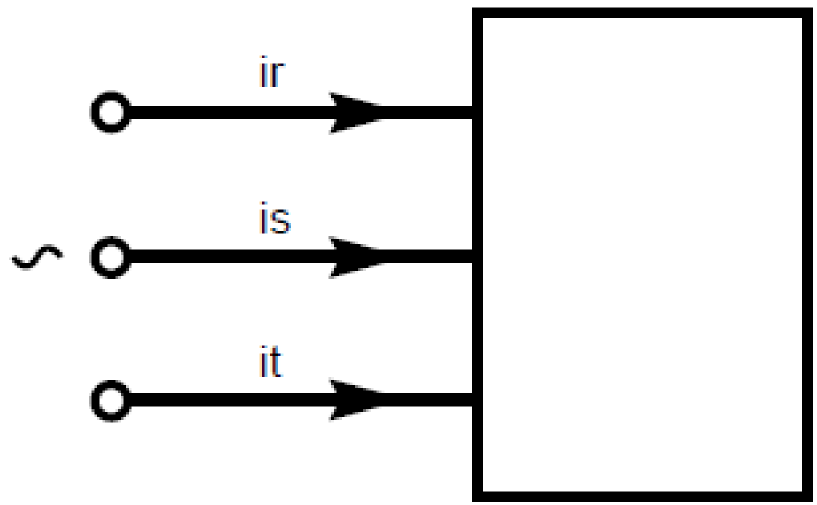
Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas des harmoniques de rang 3:

Considérons une charge triphasée non linéaire, équilibrée, symétrique, sans raccordement au neutre.



charge triphasée.

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas des harmoniques de rang 3:

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 :

$$I_{r3}=I_3\sin(3\omega t)$$

$$I_{s3}=I_3\sin 3(\omega t-2p/3)=I_3\sin(3\omega t-2p)=I_3\sin(3\omega t)$$

$$I_{t3}=I_3\sin 3(\omega t+2p/3)=I_3\sin(3\omega t)$$

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas des harmoniques de rang 3:

Soit :

$$I_{r3} = I_{s3} = I_{t3}$$

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.

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas des harmoniques de rang 3:

D'où :

Les charges triphasées, équilibrées et symétriques, ne génèrent donc pas d'harmonique de rang 3.

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas des harmoniques de rang 3:

D'où :

Les charges triphasées, équilibrées et 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 ± 1.

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

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

$$h = (n.p) \pm 1$$

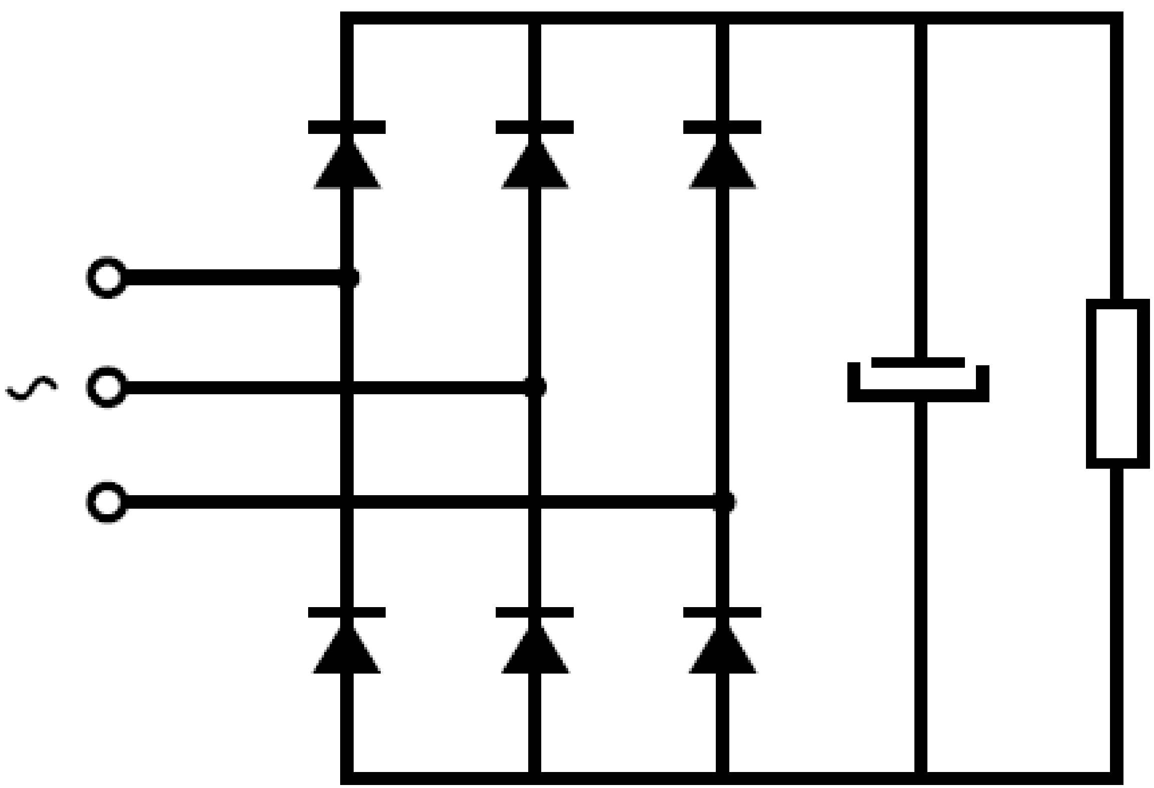
Où n est un nombre entier (1, 2, 3, 4, 5,…) et p le nombre de redresseurs composant le dispositif.

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas d'un redresseur à 4 diodes :



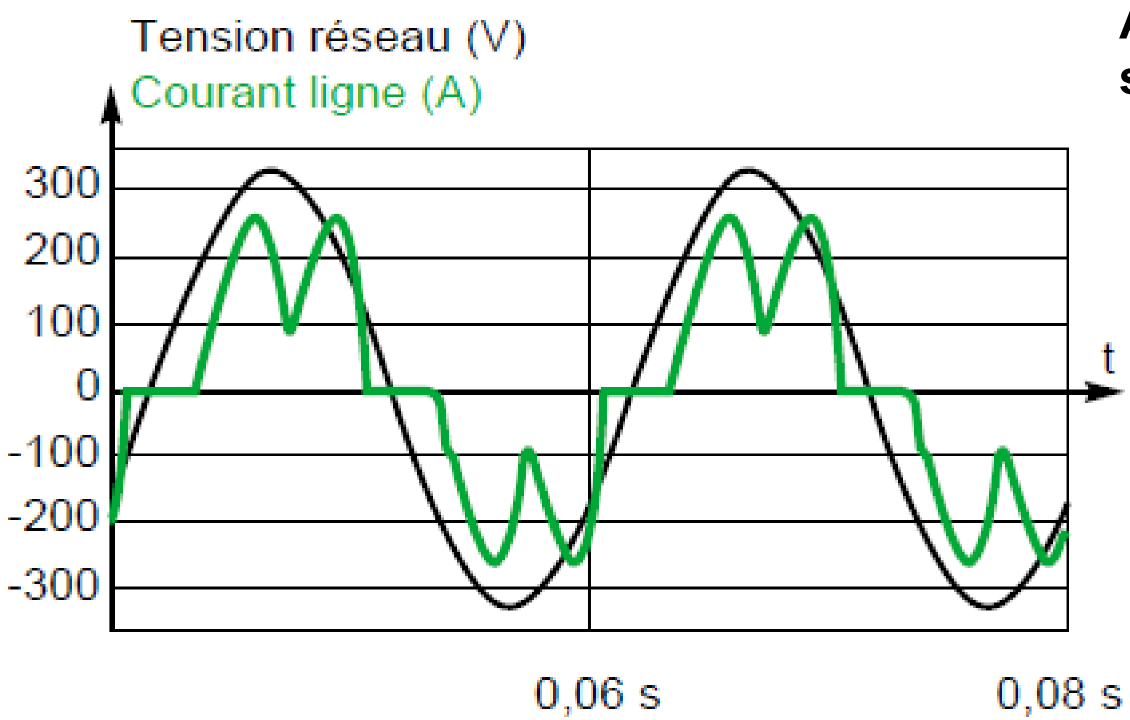
Pont redresseur à 4 diodes avec filtre capacitif

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas d'un redresseur à 4 diodes :



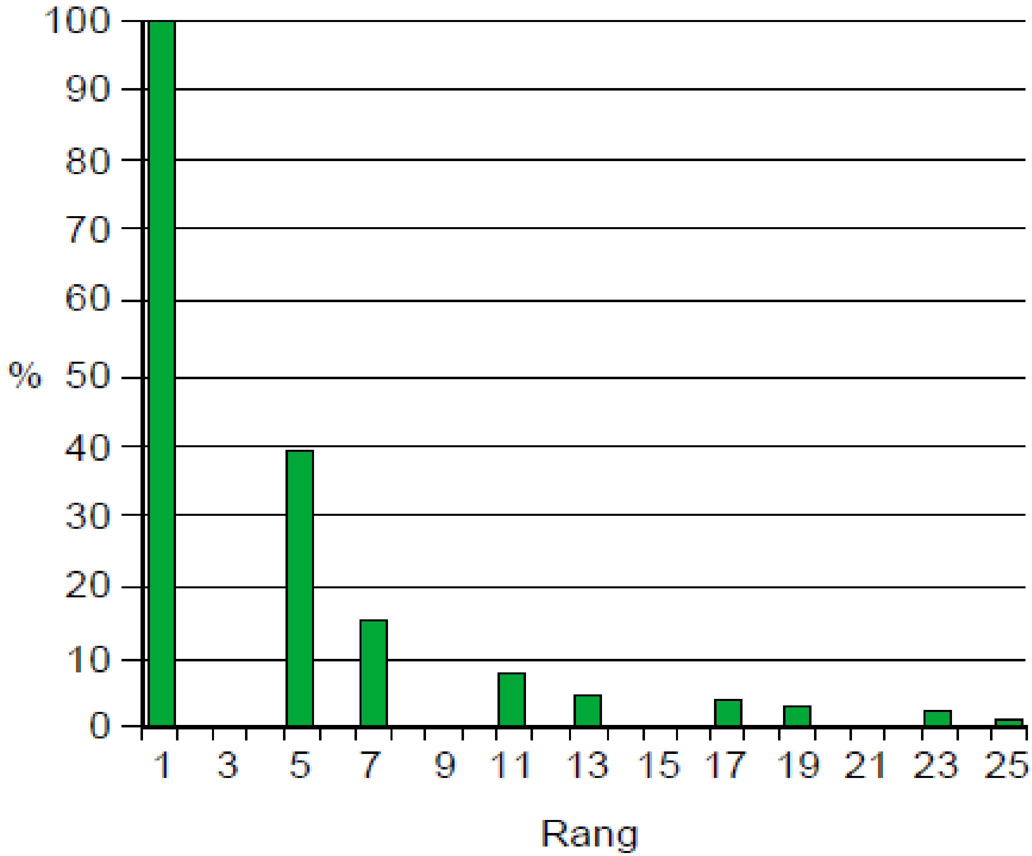
Allure du courant absorbé par le schéma de la figure précédente.

Origine des harmoniques

Courant absorbé par les charges non linéaires

Charges triphasées symétriques :

Cas d'un redresseur à 4 diodes :



Spectre harmonique du courant absorbé par le circuit

Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

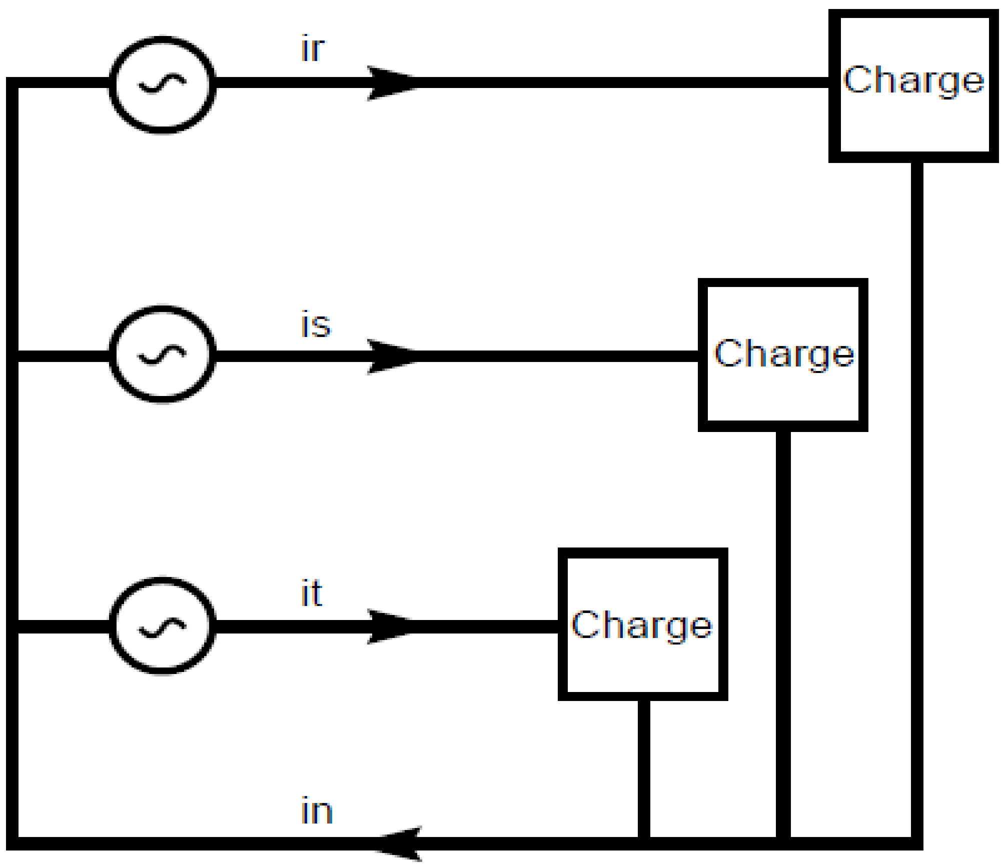
Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Considérons un système simplifié constitué d'une source triphasée équilibrée et de trois charges monophasées identiques, connectées entre phases et neutre.

Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3



Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Si les charges sont linéaires, les courants constituent un système triphasé équilibré. La somme de courants de phase est donc nulle, ainsi que le courant neutre.

$$i_n = \Sigma i_i = 0$$

Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Dans le cas de charges non linéaires, les courants de phases ne sont pas sinusoïdaux et contiennent donc des harmoniques, en particulier de rang multiple de 3.

Les courants des trois phases étant égaux :

$$I_{r3} = I_{s3} = I_{t3} = I_3$$

Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Le courant dans le neutre étant égal à la somme des courants des phases, la composante de rang 3 du courant neutre est égal à la somme des composantes de rang 3, soit :

$$i_{n3} = 3i_{r3}$$

Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

D'une manière générale, pour des charges équilibrées, les courants harmoniques de rang multiple de 3 sont en phase et s'additionnent arithmétiquement dans le conducteur de neutre, alors que les composantes fondamentales et les harmoniques de rang non multiple de 3 s'annulent.

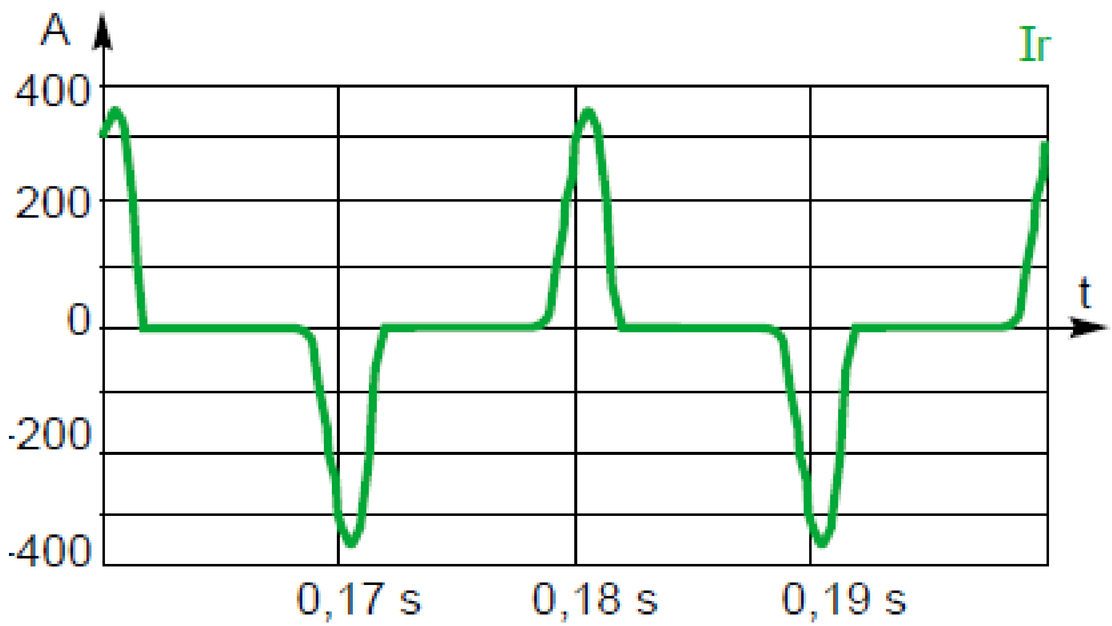
Les courants harmoniques 3 sont donc des courants homopolaires, circulant en phase dans les trois phases.

Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Allure du courant dans le neutre :

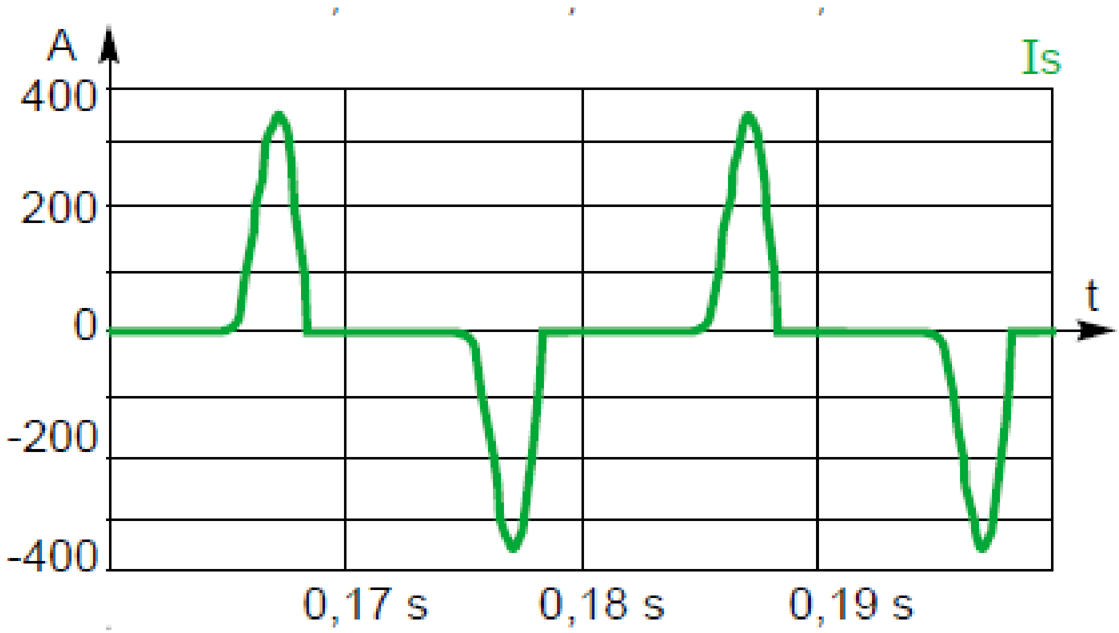


Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Allure du courant dans le neutre :

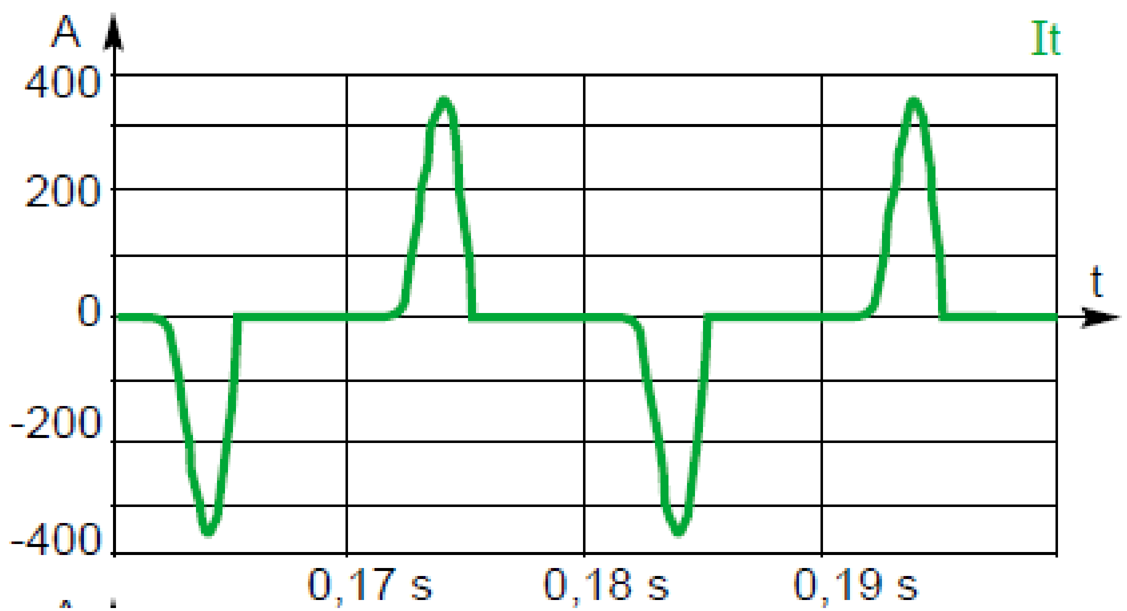


Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Allure du courant dans le neutre :

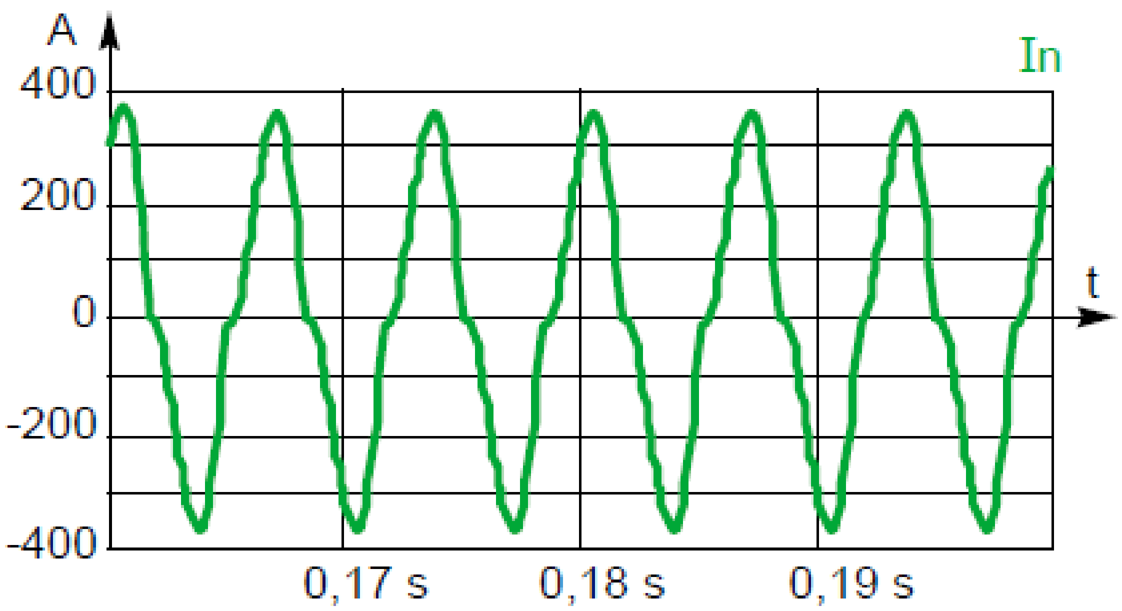


Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Allure du courant dans le neutre :

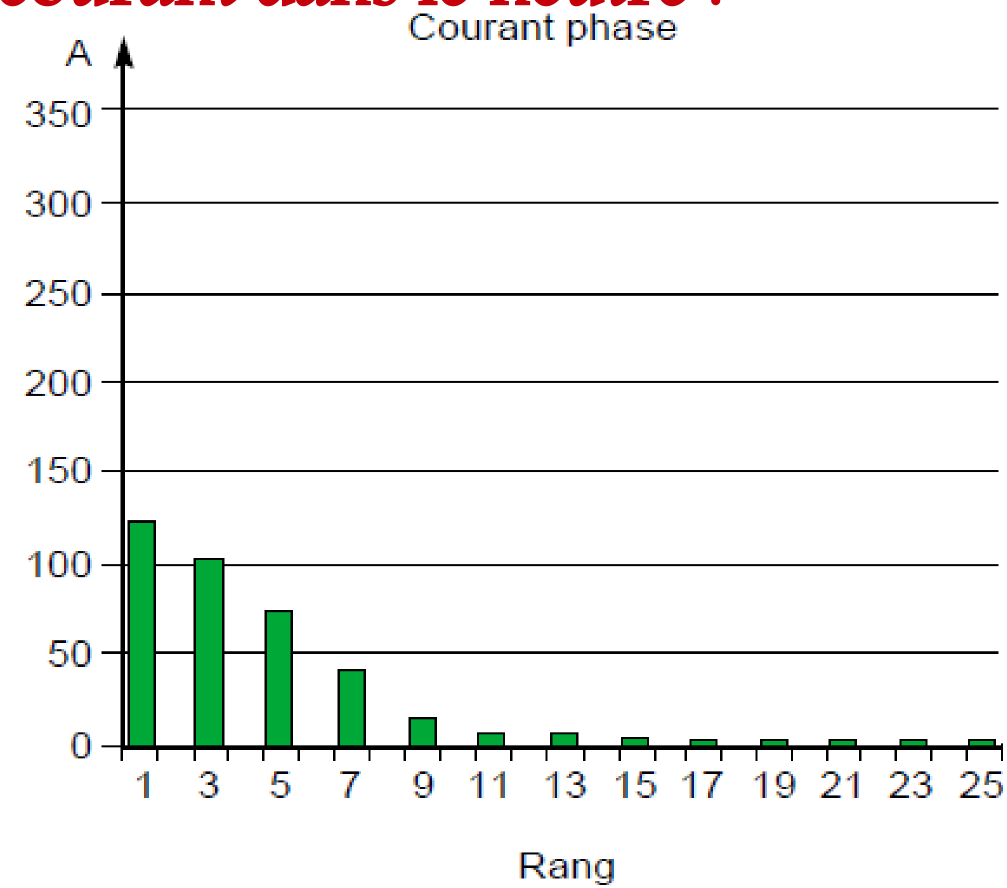


Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Allure du courant dans le neutre :

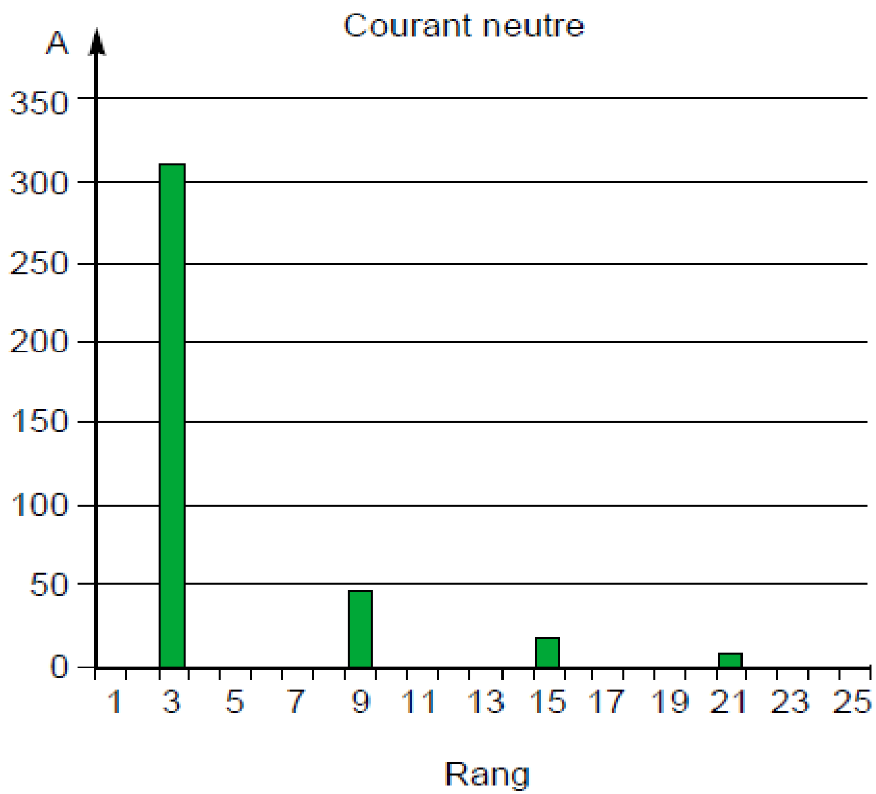


Origine des harmoniques

Surcharge du conducteur de neutre

Harmoniques de rang 3 et multiple de 3

Allure du courant dans le neutre :

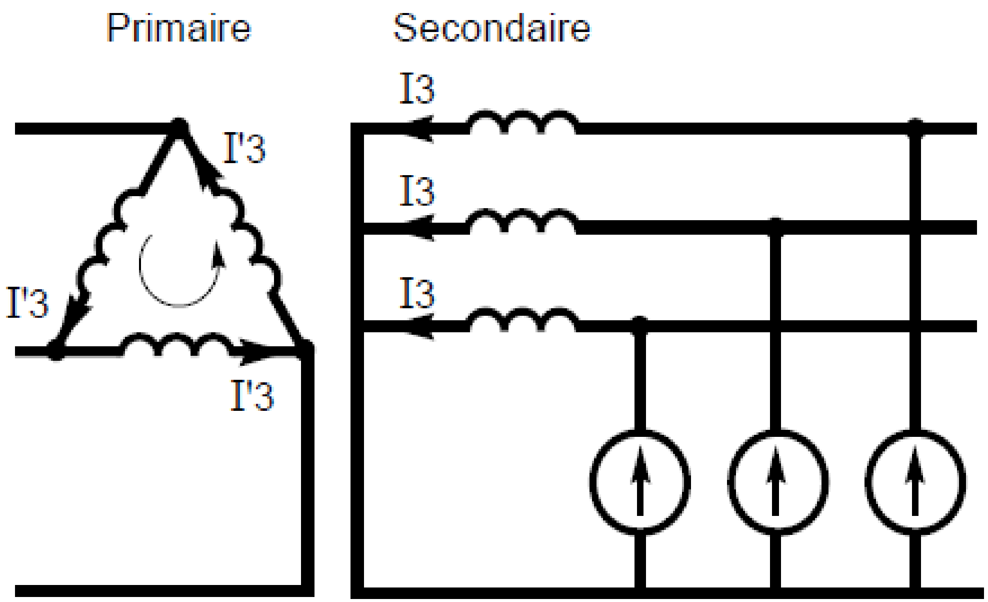


Origine des harmoniques

L'harmonique 3 dans les transformateurs

Transformateur triangle étoile

Considérons un transformateur triangle – étoile, alimentant des charges non linéaires, identiques, connectées entre phases et neutre.



Origine des harmoniques

L'harmonique 3 dans les transformateurs

Transformateur triangle étoile

Chacune de ces charges génère un courant harmonique de rang 3. Rappelons que ces courants (I3), harmoniques de rang 3, sont égaux.

Les courants harmoniques de rang 3 dans les enroulements primaires du transformateur sont donc également identiques entre eux, et notés I'3.

Origine des harmoniques

L'harmonique 3 dans les transformateurs

Transformateur triangle étoile

En chaque noeud du triangle du primaire, les courants harmoniques de rang 3 se compensent, et le courant dans la ligne ne contient donc pas d'harmonique de rang 3.

Les courants harmoniques de rang 3 ne sont donc pas transmis au réseau. Par contre, ces courants circulent dans les enroulements primaires du transformateur et provoquent un échauffement supplémentaire.

Origine des harmoniques

L'harmonique 3 dans les transformateurs

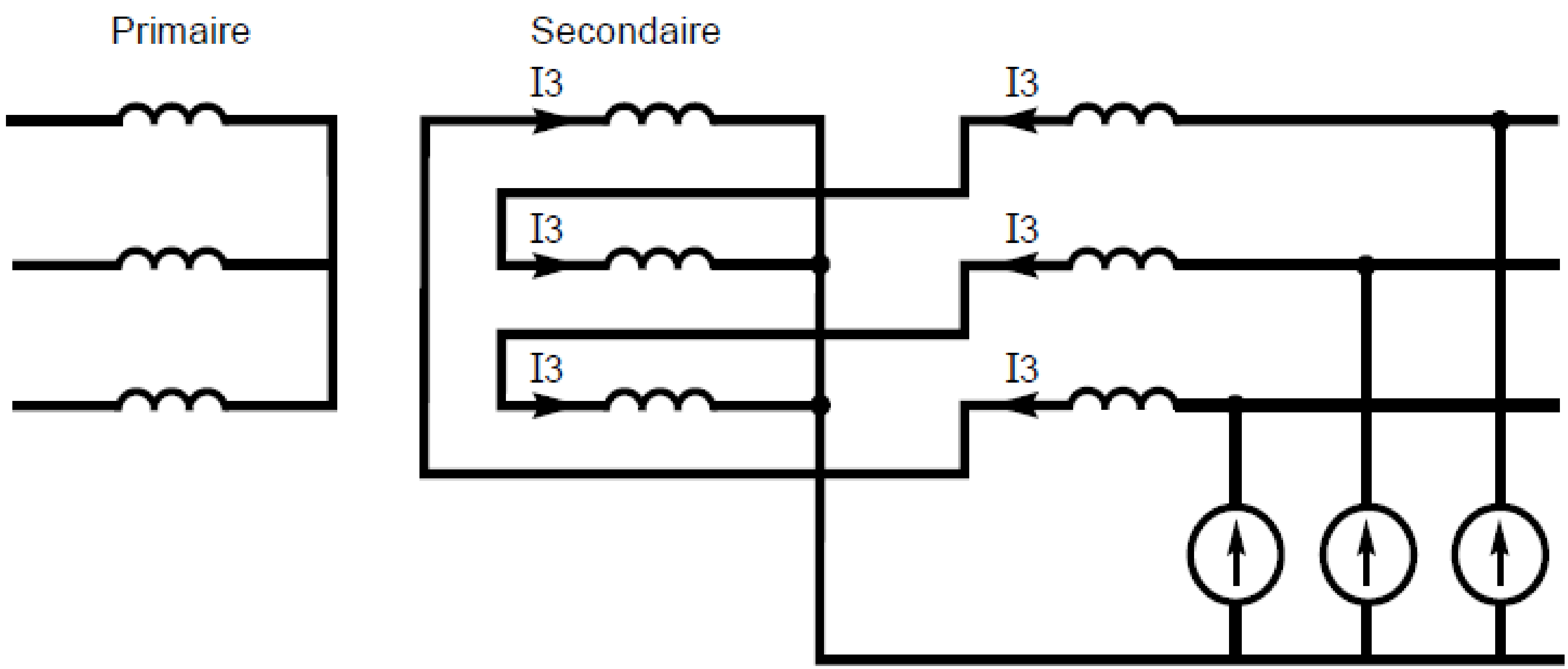
Transformateur triangle étoile

Par ailleurs, la circulation de ces courants est responsable d'une distorsion de la tension au primaire, en raison des impédances des enroulements du transformateur.

Origine des harmoniques

L'harmonique 3 dans les transformateurs

Transformateur à secondaire zigzag



Origine des harmoniques

L'harmonique 3 dans les transformateurs

Transformateur à secondaire zigzag

On voit aisément sur cette figure que les ampères-tours sur une même colonne au secondaire s'annulent. Il en résulte qu'aucun courant harmonique de rang 3 ne circule au primaire.

Référence : Cahiers Techniques Schneider, ct202,pdf

Origine des harmoniques

Les harmoniques de courant

Valeur instantanée :

$$u(t) = U\sqrt{2}\cos(\omega t)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k\sqrt{2}\cos(k\omega t - \phi_k)$$

Valeur efficace :

$$I^2 = \sum_{k=1}^{\infty} {I_k}^2$$

Taux de distorsion harmonique THDi:

$$T_{HI1} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} {I_k}^2}}{I_1}$$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de courant

Puissance instantanée :

$$
\begin{aligned}
p(t) &= u(t)i(t) \\
&= 2U\sum_{k=1}^{\infty} I_k \cos(\omega t)\cos(k\omega t - \phi_k) \\
&= U\sum_{k=1}^{\infty} I_k \left(\cos((k+1)\omega t - \phi_k) + \cos((k-1)\omega t - \phi_k)\right)
\end{aligned}
$$

Puissance moyenne (active) : $P = UI_1\cos(\phi_1)$

Puissance réactive : $Q = UI_1\sin(\phi_1)$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de courant

Puissance moyenne (active) :

$$P = UI_1 \cos(\phi_1)$$

Puissance réactive :

$$Q = UI_1 \sin(\phi_1)$$

Puissance apparente :

$$S^2 = U^2.I^2 = U^2.(I_1^{\,2} + I_2^{\,2} + \ldots + I_n^{\,2}) = U^2.I_1^{\,2} + U^2.(I_2^{\,2} + \ldots + I_n^{\,2})$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + U^2.(I_2^{\,2} + \ldots + I_n^{\,2}) = P^2 + Q^2 + D^2$$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de courant

Puissance apparente :

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

D est la puissance déformante.

$$\begin{aligned} D^2 &= S^2 - P^2 - Q^2 \\ &= U^2(I^2 - {I_1}^2) \\ &= U^2 \sum_{k=2}^{\infty} {I_k}^2 \end{aligned}$$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de courant

Facteur de puissance :

$$
\begin{aligned}
F_p &= \frac{P}{S} \\
&= \frac{U I_1 \cos \phi_1}{U I} \\
&= \frac{I_1}{I} \cos \phi_1
\end{aligned}
$$

Facteur de déplacement :

$$\mathrm{DPF} = \cos \phi_1$$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de tension

Valeur instantanée :

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sqrt{2}\cos(k\omega t + \phi_k)$$
$$i(t) = I\sqrt{2}\cos(k\omega t)$$

Valeur efficace :

$$U^2 = \sum_{k=1}^{\infty} {U_k}^2$$

Taux de distorsion harmonique THDv:

$$T_{HV1} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} {U_k}^2}}{U_1}$$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de tension

Puissance instantanée :

$$
\begin{aligned}
p(t) &= u(t)i(t) \\
&= 2I \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cos(\omega t) \cos(k\omega t + \phi_k) \\
&= I \sum_{k=1}^{\infty} U_k \left(\cos((k+1)\omega t + \phi_k) + \cos((k-1)\omega t + \phi_k) \right)
\end{aligned}
$$

Puissance moyenne (active) : $P = U_1 I \cos(\phi_1)$

Puissance réactive : $Q = U_1 I \sin(\phi_1)$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de tension

Puissance moyenne (active) :

$$P = U_1 I \cos(\phi_1)$$

Puissance réactive :

$$Q = U_1 I \sin(\phi_1)$$

Puissance apparente :

$$S^2 = I^2.U^2 = I^2.(U_1^2 + U_2^2 + \ldots + U_n^2) = I^2.U_1^2 + I^2.(U_2^2 + \ldots + U_n^2)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + I^2.(U_2^2 + \ldots + U_n^2) = P^2 + Q^2 + D^2$$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de tension

Puissance apparente :

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

D est la puissance déformante.

$$D^2 = I^2 \sum_{k=2}^{\infty} {U_k}^2$$

Origine des harmoniques

Les harmoniques de tension

Facteur de puissance :

$$F_p = \frac{U_1}{U} \cos \phi_1$$

Facteur de déformation :

$$\text{DPF} = \cos \phi_1$$

Origine des harmoniques

Harmoniques de tension et de courant :

Valeur instantanée :

$$u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \sqrt{2} \cos(k\omega t + \alpha_k)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sqrt{2} \cos(k\omega t + \alpha_k - \phi_k)$$

Origine des harmoniques

Harmoniques de tension et de courant :

Puissance instantanée :

$$\begin{aligned} p(t) &= u(t)i(t) \\ &= 2\left(\sum_{k=1}^{\infty} U_k \cos(k\omega t + \alpha_k)\right)\left(\sum_{l=1}^{\infty} I_l \cos(l\omega t + \alpha_l - \phi_l)\right) \\ &= 2\sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty} U_k I_l \cos(k\omega t + \alpha_k)\cos(l\omega t + \alpha_l - \phi_l) \\ &= \sum_{k=1}^{\infty}\sum_{l=1}^{\infty} U_k I_l \left(\cos((k+l)\omega t + 2\alpha_k - \phi_k)\right. \\ &\quad \left. + \cos((k-l)\omega t + \phi_l)\right) \end{aligned}$$

Origine des harmoniques

Harmoniques de tension et de courant :

Puissance moyenne (active) :

$$P = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos(\phi_k)$$

Puissance pour chaque harmonique :

$$\begin{aligned} P_k &= U_k I_k \cos(\phi_k) \\ Q_k &= U_k I_k \sin(\phi_k) \\ S_k &= U_k I_k \end{aligned}$$

Origine des harmoniques

Effets des harmoniques:

- Échauffement du câble de neutre (120% à 130% du courant de phase) ; rang 3 et multiples.

- Disjonctions principales (surintensité) et différentielles (courant de défaut) intempestives ;

- Valeur du courant efficace plus élevée que le nécessaire (I >In);

- Sur-échauffement des câbles par effet pelliculaire (Fréquences élevées) ;

- Résonance en tension aux endroit des sources (Présence des condensateurs de relèvement du FP);