



n° 160

**harmoniques
en amont des
redresseurs
des ASI**

Jean Noël Fiorina

**Entré chez Merlin Gerin en 1968
comme agent technique de
laboratoire au département ACS
- Alimentations Convertisseurs
Statiques - il participe à la mise au
point des convertisseurs statiques.
En 1977, diplômé ingénieur de
l'ENSERG après 3 ans de cours du
soir, il réintègre le département ACS.
D'abord ingénieur de dévelop-
pement, puis chargé de projet, il
devient ensuite responsable
conception au département EPS
- Electricity Power Supply -. Il est en
quelque sorte le père des onduleurs
de moyenne et forte puissance.
Aujourd'hui à la Division des
Alimentations, il prépare en tant que
responsable innovations, les
alimentations sans coupure de
demain.**

lexique

$\cos \varphi_1$ facteur de déphasage = $\frac{P_1}{S_1}$

D % taux global de distorsion = $100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1}$

Hn % taux individuel d'harmoniques = $100 \frac{Y_n}{Y_1}$

l facteur de puissance = $\frac{P}{S}$

P_1 puissance active de la composante fondamentale

S_1 puissance apparente de la composante fondamentale

n facteur de déformation = $\frac{\lambda}{\cos \varphi_1}$

Y_1 valeur efficace du fondamental (courant ou tension)

Y_n valeur efficace de l'harmonique de rang n ; pour le courant : I_n (I_{nRMS} selon la norme CEI 146-4)

Z_n valeur de l'impédance pour l'harmonique n ($U_n = Z_n I_n$)

harmoniques en amont des redresseurs des ASI

sommaire

1. Harmoniques sur les réseaux	Conséquences des courants harmoniques	p. 4
	Une nécessaire normalisation	p. 4
2. Redresseur pont de Graëtz à thyristors	Courants harmoniques générés par un redresseur pont de Graëtz	p. 6
	Influence de l'impédance de source	p. 7
	Taux de distorsion en courant	p. 10
3. Minimisation des perturbations harmoniques	Mise en place d'une inductance à l'entrée du redresseur	p. 11
	Utilisation d'un redresseur à deux ponts	p. 12
	Redresseur à plus de deux ponts	p. 15
	Utilisation d'un filtre passif d'harmoniques	p. 16
4. Conclusion et perspectives		p. 18
5. Bibliographie		p. 20

Les ASI - Alimentations Sans Interruption - comme la plupart des convertisseurs statiques prélèvent l'énergie sur le réseau alternatif par l'intermédiaire de redresseurs.

Souvent à base de thyristors, ces redresseurs sont générateurs d'harmoniques.

Merlin Gerin, fabricant d'ASI connaît bien ce problème et, par ce Cahier Technique, met sa connaissance à votre disposition.

Dans ce document, l'auteur met en évidence tout d'abord la nécessité d'une coexistence normée entre les équipements, pollueurs et pollués.

Il rappelle ensuite quels sont les courants et tensions harmoniques produits par les redresseurs classiques (pont de Graëtz à thyristors) et présente ensuite les différentes solutions permettant de les minimiser.

Enfin, dans sa conclusion, il évoque l'apparition prochaine d'ASI non polluantes et de convertisseurs dépollueurs.

Nota : les problèmes d'harmoniques **en aval** des onduleurs qui alimentent des charges non linéaires sont traités dans le Cahier Technique n° 159. Il comporte par ailleurs les définitions et expressions mathématiques relatives aux harmoniques.

Dans le présent document, seules les principales sont rappelées en page 2.

1. harmoniques sur les réseaux

conséquences des courants harmoniques

Les courants harmoniques générés par certains matériels, tels que convertisseurs statiques, luminaires, fours à arc etc, (s'ils sont nombreux ou puissants par rapport à la puissance de la source), peuvent avoir des conséquences néfastes sur les autres matériels raccordés sur le même réseau.

Les effets de ces courants harmoniques sont développés dans le Cahier Technique n° 152 "Les perturbations harmoniques dans les réseaux industriels et leur traitement".

Rappelons que les courants harmoniques :

- provoquent des échauffements supplémentaires notamment dans les lignes, les transformateurs et les batteries de condensateurs,
- causent des vibrations et des bruits dans les matériels électromagnétiques,
- peuvent perturber les liaisons et les équipements "courant faible".

Par ailleurs, une tension déformée peut perturber certains récepteurs tels que régulateurs, convertisseurs statiques (le passage à zéro de la tension devient imprécis).

Ainsi, un des éléments d'appréciation de la qualité de l'électricité est son taux de distorsion en tension.

une nécessaire normalisation

L'électricité étant aujourd'hui considérée comme un produit, (particulièrement en Europe avec la directive du 25 juillet 1985 référencée : 85/374/CEE), la responsabilité du producteur est engagée en cas de dommages causés par un excès d'harmoniques.

C'est pourquoi, afin de pouvoir garantir un niveau de qualité suffisant à l'ensemble des utilisateurs, les

distributeurs sont amenés à fixer ou à faire fixer des limites aux perturbations engendrées par certains utilisateurs.

Pour cela, il s'agit de définir :

- d'une part, un taux de distorsion maximum permettant un fonctionnement correct de la plupart des utilisations (niveau de compatibilité),
 - d'autre part, un taux de perturbations maximum pour chacun des utilisateurs afin que les effets cumulés des différentes perturbations produites permettent la compatibilité de fonctionnement entre tous les matériels raccordés sur le même réseau ; tous doivent fonctionner correctement.
- Donc, si cette compatibilité est nécessaire entre abonnés elle l'est également à l'intérieur des installations des abonnés eux-mêmes (tertiaire ou industrie).

L'utilisateur final est tributaire du niveau de perturbations induites par les matériels qu'il installe, c'est pourquoi il est important que les fabricants affichent clairement quels sont les niveaux de perturbations engendrées par leurs produits.

Des normes doivent donc fixer les niveaux de perturbations harmoniques acceptables, pour les réseaux et pour les pollueurs.

Niveau de compatibilité de fonctionnement

La norme CEI 1000-2-2 de mai 90 définit les niveaux de compatibilité pour les réseaux publics d'alimentation à Basse Tension -BT-. Les niveaux retenus par cette norme pour la BT étant les mêmes que ceux publiés par les revues du CIGREE, (Electra n° 77 de juillet 91 et n° 123 de mars 89), il est probable que les niveaux retenus pour la Moyenne Tension -MT- et la Haute Tension -HT- correspondront également à ces recommandations (cf. tableau fig. 1).

Niveaux d'émission

Il faudrait définir des limites pour chaque abonné et éviter d'avoir à faire

des contrôles systématiques lors de la mise en service d'équipements.

Par ailleurs, pour un même niveau de perturbation en courant, le taux de distorsion en tension, au point de raccordement, dépend de l'impédance du réseau en ce point.

Une solution équitable consiste à autoriser des puissances perturbatrices proportionnelles à la puissance souscrite par chaque usager et pour chaque classe de tension : BT, MT, HT. Les niveaux d'émission sont à considérer dans les applications domestiques et industrielles.

■ applications domestiques

En BT, le distributeur d'énergie ne pouvant contrôler la situation, des normes fixent les niveaux de perturbation que doivent respecter les appareils.

A titre d'exemple, la norme CEI 555-2 "Perturbations produites dans les réseaux d'alimentation par les appareils électrodomestiques et les équipements analogues" impose des valeurs limites en courant pour chaque harmonique (pour les appareils absorbant un courant efficace ≤ 16 A (cf. tableau fig. 2).

■ applications industrielles

Dans ce domaine, il n'y a pas aujourd'hui de norme internationale, mais un consensus semble se dégager autour de la notion d'étapes :

□ étape 1 : acceptation automatique.

Cette acceptation dépend du niveau de tension du réseau et concerne des équipements de faible puissance vis-à-vis de la puissance souscrite.

Par exemple, pour EDF, la règle est d'avoir une puissance perturbatrice inférieure ou égale à 1 % de la puissance de court-circuit minimale en situation normale au point de couplage. Une extension de cette tolérance est admise si la puissance perturbatrice totale du client est inférieure à :

- 4 MVA en HT,
- 500 kVA en MT,
- 40 kVA en BT.

harmoniques impairs non multiples de 3			harmoniques impairs multiples de 3			harmoniques pairs		
rang harmonique n	tension harmonique %		rang harmonique n	tension harmonique %		rang harmonique n	tension harmonique %	
	BT/MT	HT		BT/MT	HT		BT/MT	HT
5	6	2	3	5	2	2	2	1,5
7	5	2	9	1,5	1	4	1	1
11	3,5	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,5
13	3	1,5	21	0,2	0,2	8	0,5	0,2
17	2	1	> 21	0,2	0,2	10	0,5	0,2
19	1,5	1				12	0,2	0,2
23	1,5	0,7				> 12	0,2	0,2
25	1,5	0,7						
> 25	$0,2 + \frac{12,5}{n}$						$0,1 + \frac{2,5}{n}$	

Taux global de distorsion : 8 % dans les réseaux BT et MT - 3 % dans les réseaux HT

fig. 1 : valeurs indicatives des niveaux (cibles) de compatibilité pour les tensions harmoniques (en % de la tension nominale à la fréquence fondamentale), dans les réseaux d'énergie à HT (transport), MT et BT (extraits d'un article paru dans le numéro 123 de Electra).

étape 2 : acceptation sous réserve. Lorsque, pour un client donné, les limites précédentes sont dépassées, le fournisseur d'énergie définit généralement un taux de distorsion maximum au point de raccordement. Dans le cas où ces niveaux risqueraient d'être dépassés, le distributeur se réserve le droit de demander des moyens complémentaires de compensation si le taux est dépassé.

étape 3 : acceptation à titre exceptionnel et précaire. Lorsque les limites de l'étape 2 sont dépassées mais sans toutefois entraîner de dépassement du niveau de compatibilité parce que d'autres usagers ne créent pas d'harmoniques, l'autorisation peut être délivrée à titre précaire.

Enfin, pour clarifier le comportement des appareils générateurs d'harmoniques, certaines normes sont en cours d'élaboration ou de modification.

rang de l'harmonique	courant harmonique maximal admissible (en ampères)
harmoniques impairs	
3	2,3
5	1,14
7	0,77
9	0,4
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times \frac{15}{n}$
harmoniques pairs	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times \frac{8}{n}$

fig. 2 : limites des composantes harmoniques du courant en usage domestique ($I_n \leq 16$ A).

2. redresseur pont de Graëtz à thyristors

Les ASI sont composées d'un convertisseur alternatif/continu (redresseur), d'une batterie d'accumulateurs (qui peut être alimentée par le redresseur ou par un chargeur spécifique) et d'un convertisseur continu/alternatif (onduleur) (cf. fig. 3).

Dans le cas général où le convertisseur d'entrée a pour fonction de charger ou d'entretenir la charge de la batterie sous une tension constante et de fournir la puissance nécessaire à l'onduleur, il utilise de façon classique des thyristors montés en pont de Graëtz.

Il existe d'autres types de redresseurs, mais le pont de Graëtz triphasé est le plus utilisé, particulièrement dans les ASI de forte puissance, d'où l'étude suivante des courants harmoniques générés par le pont de Graëtz triphasé, entièrement contrôlé, ainsi que les moyens de les minimiser.

courants harmoniques générés par un redresseur pont de Graëtz

Le redresseur (cf. fig. 4) est supposé être associé à une inductance de filtrage du courant continu de très grande valeur de façon à ce que le courant I_d soit parfaitement lissé. L'impédance de source est considérée nulle dans un premier temps.

Les courants en ligne I_1 , I_2 et I_3 prennent à tour de rôle la valeur (et la forme) du courant continu I_d .

Chaque thyristor assure la conduction du courant pendant $1/3$ de la période.

Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle, le courant s'établit instantanément à sa valeur I_d lorsqu'un thyristor devient conducteur.

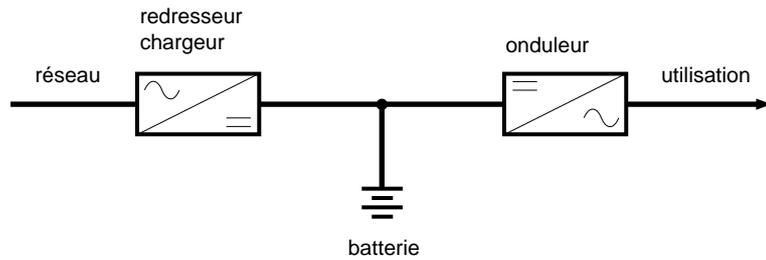


fig. 3 : schéma d'une ASI.

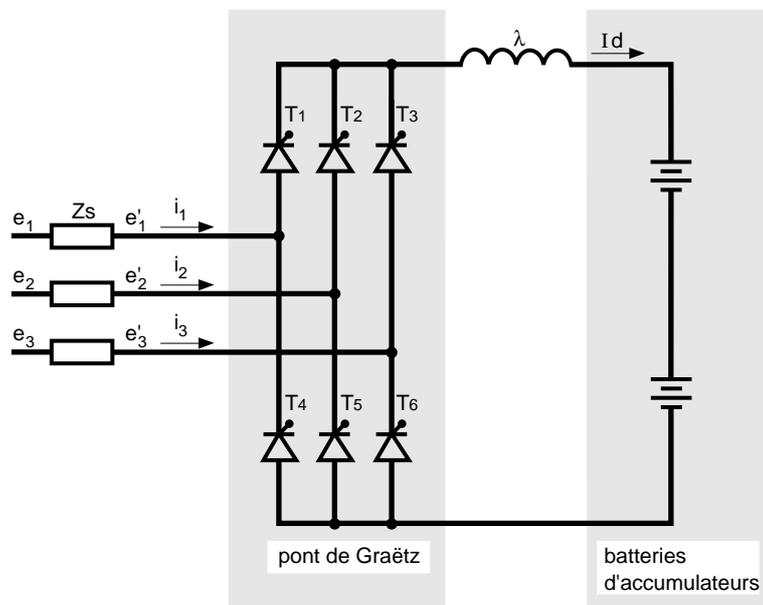


fig. 4 : schéma du redresseur chargeur.

Les courants fournis par la source sont de forme rectangulaire (cf. fig. 5). Leur spectre est constitué par les harmoniques de courant :

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

avec $n = 6k \pm 1$, k prenant les valeurs 1, 2, 3... (entiers naturels) et I_1 étant la valeur efficace du fondamental : $I_1 = 0,78 I_d$.

Pour les premiers harmoniques de courant, les amplitudes sont donc en fonction de I_1 :

- $I_5 = 20\%$ de I_1 ,
- $I_7 = 14\%$ de I_1 ,
- $I_{11} = 9\%$ de I_1 ,
- $I_{13} = 8\%$ de I_1 .

Le taux global de distorsion de ce courant est de 30 %.

Le taux global de distorsion de la tension est nul dans ce cas puisque la source est supposée avoir une impédance nulle (une puissance infinie).

influence de l'impédance de source

Celle-ci étant de nature selfique, son inductance interdit les variations instantanées du courant.

Le phénomène d'empiètement

Lorsque le thyristor T_2 (cf. fig. 6a) est commandé alors que le thyristor T_1 est conducteur, le courant I_2 s'établit dans le thyristor T_2 tandis que le courant I_1 diminue dans le thyristor T_1 .

Les inductances L s'opposent aux variations brutales de ces courants.

Pendant la durée Δt de la commutation (cf. fig. 6b), il y a conduction simultanée de deux thyristors (ce phénomène est aussi appelé empiètement).

La source est donc en régime de court-circuit interphases (1 et 2) limité par les deux inductances L .

La tension v est telle que :

$$v = e_1 + L \cdot \frac{d \cdot i_1}{dt} = e_2 + L \cdot \frac{d \cdot i_2}{dt},$$

d'où :

$$2v = e_1 + e_2 + L \cdot \frac{d \cdot i_1}{dt} + \frac{d \cdot i_2}{dt},$$

$$L \cdot \frac{d \cdot i_1}{dt} + \frac{d \cdot i_2}{dt} = L \cdot \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} = L \cdot \frac{d \cdot I_d}{dt} = 0,$$

par conséquent :

$$2v = e_1 + e_2,$$

soit :

$$v = \frac{e_1 + e_2}{2}.$$

Le même phénomène se manifeste ensuite entre T_2 et T_3 , puis entre T_3 et T_1 et aussi dans la polarité négative du redresseur entre les thyristors T_4 , T_5 et T_6 .

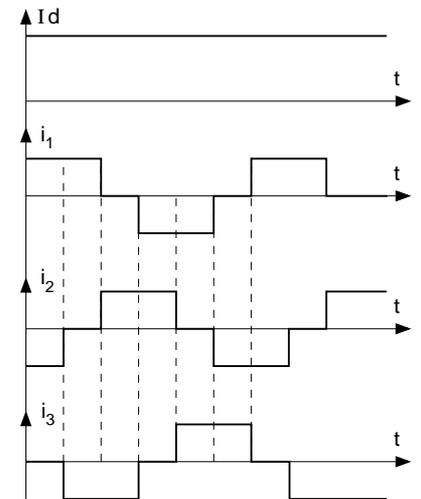
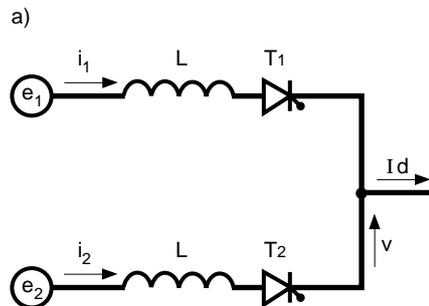
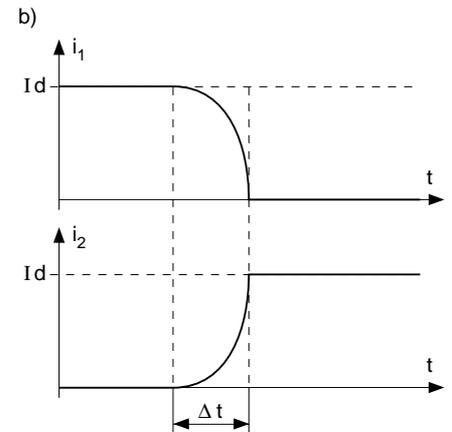


fig. 5 : courants théoriques en amont du redresseur avec impédance de filtrage aval infinie et impédance de source nulle.



e_1, e_2 : tension de source, phase-neutre
 v : tension du + des redresseurs par rapport au neutre
 L : inductance de ligne représentant l'impédance de source



Δt : durée de la commutation

fig. 6 : phénomène d'empiètement.

Pour un angle α de retard de 30° (ce qui correspond à un point de fonctionnement usuel) les tensions e'_1 , e'_2 et e'_3 , obtenues à l'entrée du redresseur, ainsi que le courant de ligne i_1 sont représentés sur la figure n° 7.

L'angle de retard α est utilisé pour régler la tension continue délivrée par le redresseur.

Dans le cas d'un redresseur/chargeur de batterie, cette tension de sortie doit être maintenue constante (cf. fig. 8) quelles que soient les variations de la tension alternative ou les conditions de charge du redresseur.

La valeur de cette tension continue s'exprime par la relation approchée :

$$U_d = 1,35 \cdot U_{\text{eff}} \cdot \cos \alpha - \frac{1}{2} \cdot L \cdot \omega \cdot I_1$$

U_{eff} : valeur efficace des tensions composées

$$(U_{\text{eff}} \text{ est égal à } e_1 \cdot \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}})$$

si l'on se réfère à la figure 6a).

Perturbations dues à l'empiétement

Il apparaît que, pour chaque demi-période, chacune des tensions simples est perturbée deux fois et présente :

- une chute de tension lors de la mise en conduction du thyristor correspondant
- une surtension lors du blocage de ce thyristor.

La durée Δt de ces perturbations est d'autant plus longue que l'inductance de ligne L est élevée.

Le courant de ligne n'étant plus rigoureusement rectangulaire, son contenu harmonique diminue, (forte atténuation des harmoniques de rangs élevés).

En conséquence la distorsion de tension résultante augmente lorsque l'impédance de ligne augmente mais pas de façon proportionnelle à cette impédance puisque le contenu harmonique du courant diminue. De plus, le temps de commutation diminue lorsque l'angle de retard α augmente, ce qui a pour conséquence de faire augmenter, pour une même valeur d'inductance, le contenu harmonique du courant et la distorsion de tension.

Contenu harmonique du courant

La figure n° 9, extraite de la norme CEI 146-4, montre comment évoluent

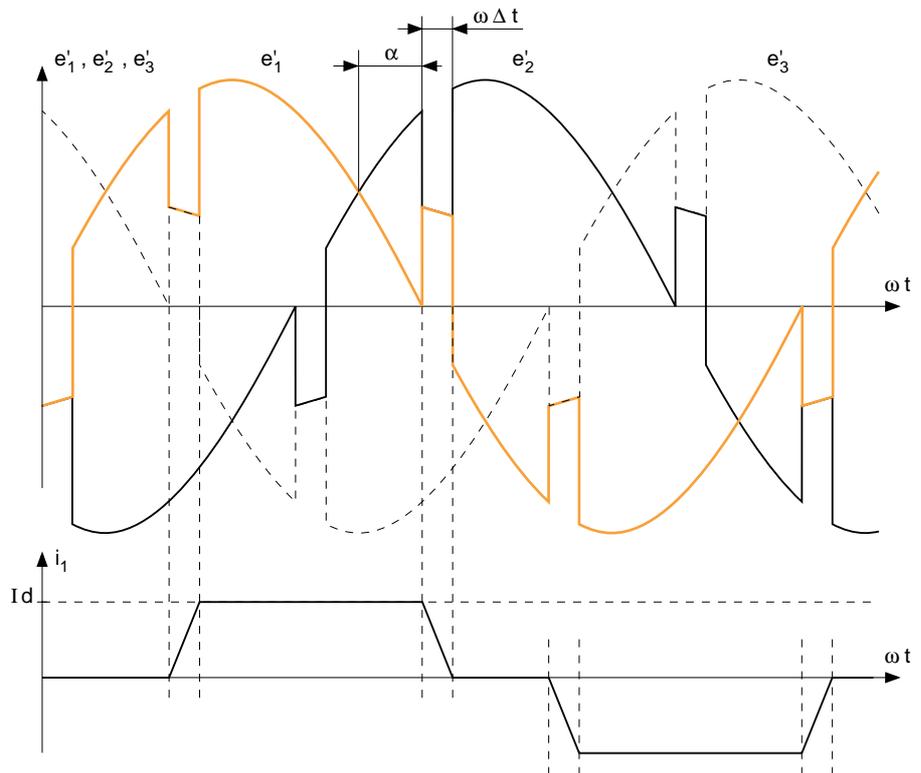


fig. 7 : empiétement pour un redresseur à thyristors avec un angle de retard α de 30° .

	éléments au plomb à recombinaison	éléments ouvert au plomb	éléments au cadmium-nickel
tension de charge (pallier haut) (en V)	$2,30 < U_{\text{charge}} < 2,50$	$2,30 < U_{\text{charge}} < 2,50$	$1,42 < U_{\text{charge}} < 1,65$
tension de floating (pallier bas) (en V)	$2,23 < U_{\text{floating}} < 2,30$	$2,18 < U_{\text{floating}} < 2,25$	$1,38 < U_{\text{floating}} < 1,50$

Les batteries étanches (à recombinaison) sont généralement chargées en utilisant uniquement le pallier bas.

Les batteries ouvertes sont chargées sous deux paliers successifs de tension.

fig. 8 : charge des batteries d'ASI à tension constante et courant limité (selon guide Gimelec).

les courants harmoniques en fonction de l'impédance de source pour différents angles de retard α . Les courants harmoniques sont représentés en valeur relative par rapport à leur valeur maximale théorique (I_{nIN}) :

$$I_{nN} = I_{\text{eff. de l'harmonique de rang } n}$$

$$I_{nIN} = \frac{I_1}{n}$$

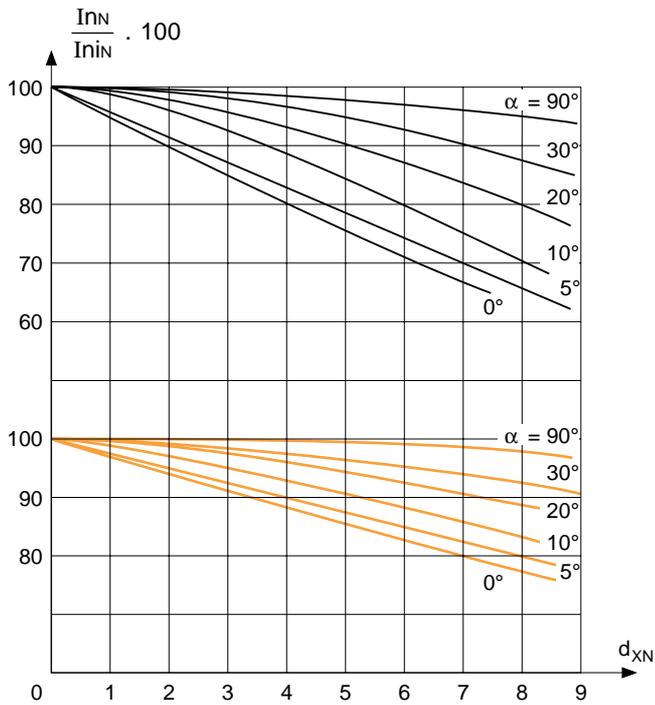
I_1 = valeur efficace du fondamental.

L'impédance de source est représentée ici par le terme d_{xN} qui correspond à la chute de tension relative côté continu. Celle-ci est due à l'inductance totale de ligne.

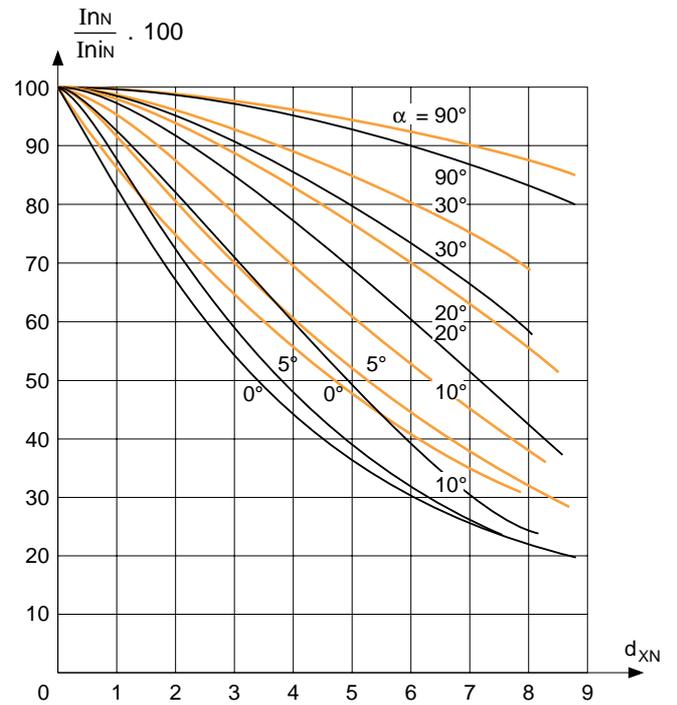
Pour ce redresseur :

$$d_{xN} = \frac{1}{2} \cdot \frac{L \cdot \omega \cdot I_1}{V_1} \cdot 100$$

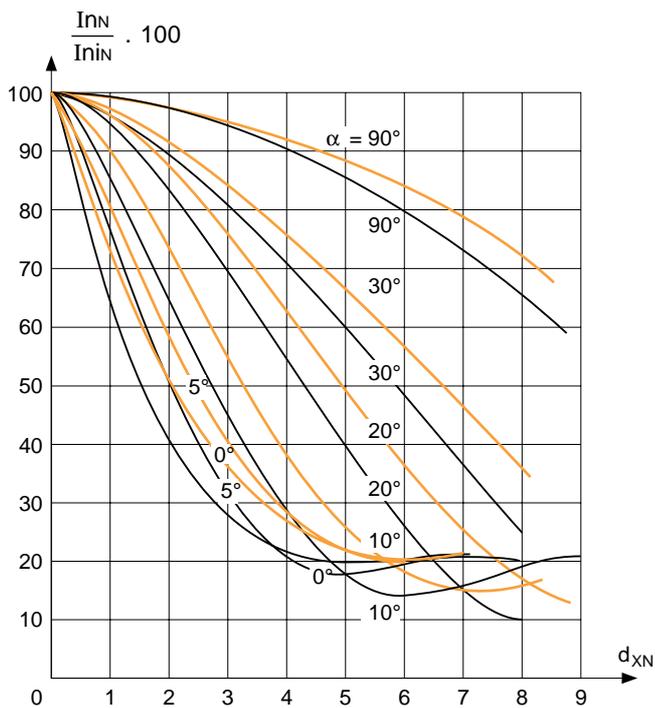
avec V_1 : valeur efficace des tensions simples.



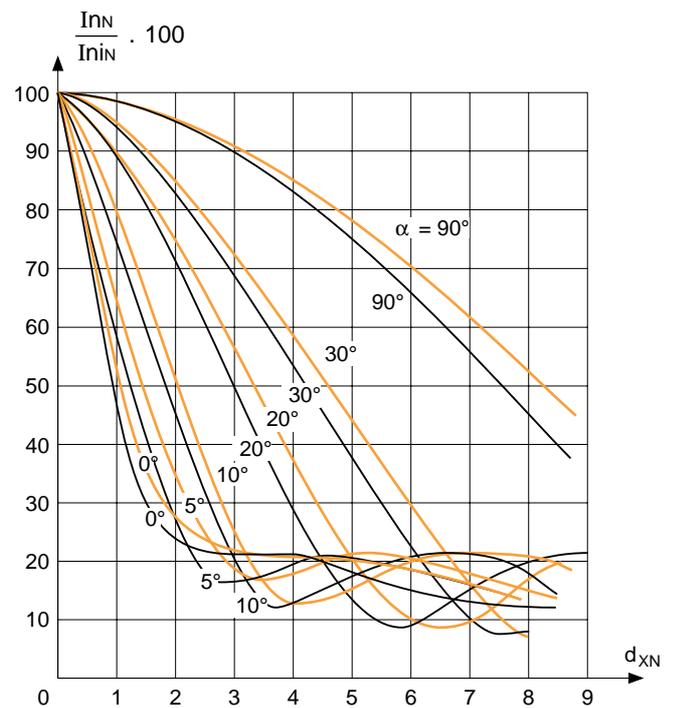
a) harmoniques de rang : — n = 5 ; — n = 7



b) harmoniques de rang : — n = 11 ; — n = 13



c) harmoniques de rang : — n = 17 ; — n = 19



d) harmoniques de rang : — n = 23 ; — n = 25

fig. 9 : évolution de l'amplitude de courants harmoniques en fonction de l'impédance de source pour différents angles de retard α du pont de Graëtz triphasé.

En triphasé équilibré, d_{XN} représente la moitié de la chute de tension relative en ligne.

En appelant U'_{cc} cette chute de tension relative assimilable à une tension de court-circuit, il est possible d'écrire :

$$d_{XN} = \frac{1}{2} \cdot U'_{cc}$$

taux de distorsion en courant

Avec l'hypothèse d'une impédance de source nulle et d'un courant continu parfaitement filtré, la valeur efficace de chaque harmonique de courant est de la forme :

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

Dans ce cas, le contenu harmonique est indépendant de α ($\Delta t = 0$).

Le taux global de distorsion théorique est donné par l'expression :

$$D \% = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{6k+1}^2 + I_{6k-1}^2)}}{I_1}$$

soit $\approx 30 \%$.

Nota : en pratique, pour les calculs, le courant ligne n'a pas rigoureusement l'allure théorique retenue pour les calculs car le courant continu ne peut pas être parfaitement lissé (cf. fig. 10). De ce fait, le contenu harmonique du courant est un peu modifié, et en particulier les harmoniques de rang $6k - 1$ sont augmentés, tandis que ceux de rang $6k + 1$ sont diminués.

Taux de distorsion de la tension

La figure n° 11 montre l'évolution du taux de distorsion de la tension à l'entrée du redresseur en fonction de l'impédance totale de source ramenée à la tension de court-circuit U'_{cc} et de l'angle de retard α à la commande des thyristors. Il apparaît que ce taux de distorsion augmente très rapidement et qu'il est difficile a priori de rester en dessous d'une valeur de 5 %.

Facteur de puissance du redresseur

■ le courant absorbé par le redresseur étant fortement déformé, le courant efficace a une valeur supérieure à celle du fondamental. La valeur efficace du courant peut être calculée en appliquant la formule de base, soit :

$$I_{eff} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{k=1}^{\infty} (I_{6k+1}^2 + I_{6k-1}^2)}$$

avec une valeur théorique (source de puissance infinie) du courant égale à :

$$I_{6k \pm 1} = \frac{I_1}{6k \pm 1}$$

d'où

$$I_{eff} = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{5}\right)^2 + \left(\frac{1}{7}\right)^2 + \dots}$$

soit :

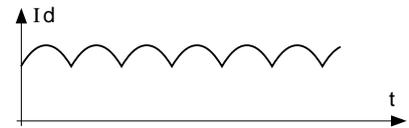
$$I_{eff} = 1,05 \cdot I_1$$

■ de plus, le courant est déphasé par rapport à la tension d'une valeur minimale égale à α , à laquelle il faut rajouter environ la moitié de l'angle d'empêchement $\omega \Delta t$.

En première approximation, l'angle d'empêchement étant faible devant l'angle de retard, un déphasage égal à α peut être retenu, d'où :

$$\cos \varphi_1 = \cos \alpha.$$

courant continu (aval)



courant de ligne (amont)

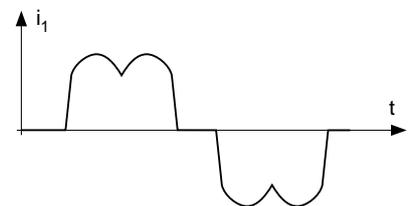


fig. 10 : courants réels en amont et en aval du redresseur.

taux de distorsion en tension D (%)

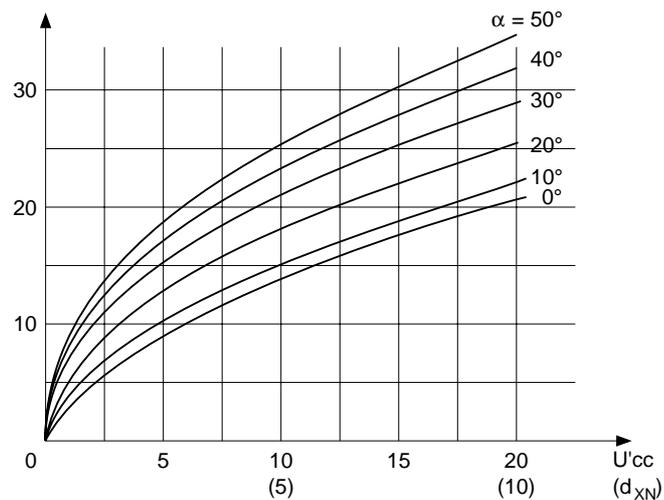


fig. 11 : évolution du taux de distorsion de la tension en fonction de l'impédance de source pour différentes valeurs de l'angle de retard α .

■ en admettant que la valeur efficace de la tension soit très proche de celle du fondamental (ce qui est vrai lorsque son taux de distorsion est faible) le facteur de puissance λ est donné avec une bonne approximation avec :

$$\lambda = 0,95 \cdot \cos \alpha,$$

puisque :

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}}$$

(U_1 et U_{eff} étant les tensions composées)

$$\text{soit : } \lambda = \frac{1}{1,05} \cdot \cos \alpha.$$

Nota : pour plus de détails, se reporter à la norme CEI 146-4 § 424.

3. minimisation des perturbations harmoniques

Les courbes de la figure 11 mettent en évidence que le taux de distorsion en tension, à l'entrée du redresseur, devient vite important même avec une impédance de source très faible. Il est donc nécessaire de réduire ce taux de distorsion afin de pouvoir utiliser des redresseurs de puissance non négligeable par rapport à la puissance souscrite.

Les courants harmoniques étant responsables de la distorsion en tension lorsqu'ils traversent l'impédance de source, c'est en diminuant leur amplitude que l'allure de la tension est améliorée.

Pour ce faire, trois méthodes classiques sont utilisées :

■ mettre une inductance supplémentaire à l'entrée du redresseur pour atténuer l'amplitude des harmoniques (en particulier ceux de rangs élevés).

■ utiliser plusieurs redresseurs alimentés par des tensions judicieusement déphasées.

Avec cette méthode, il est possible d'éliminer, par combinaison des courants, les harmoniques les plus gênants (soit les rangs les plus bas car ils ont les plus fortes amplitudes).

■ conserver un seul redresseur pont de Graëtz unique et lui associer un filtre passif destiné à éliminer les harmoniques les plus gênants et à réduire l'amplitude des autres.

Il est bien sûr possible de combiner ces méthodes afin d'optimiser le résultat.

mise en place d'une inductance à l'entrée du redresseur

La figure n° 12 donne le schéma correspondant pour une phase.

La mise en place de l'inductance L_F réduit le taux de distorsion du courant. Le taux de distorsion en tension au point A diminue.

Sa valeur peut être calculée à partir de celle présente au point B. Les inductances L_S et L_F constituant un diviseur de tensions harmoniques.

Calcul théorique du taux de distorsion

Pour chaque harmonique d'ordre n , il existe une composante de tension $V'n$ au point B telle que :

$$V'n = n \cdot (L_S + L_F) \cdot \omega \cdot I_n$$

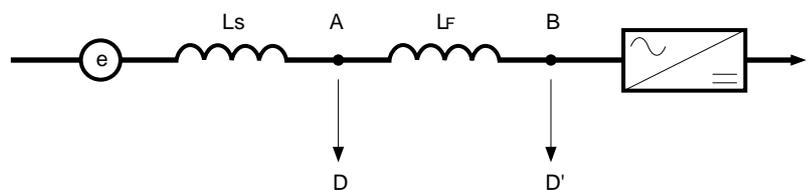
ω : pulsation du fondamental.

La tension V_n mesurée au point A est :

$$V_n = n \cdot L_S \cdot \omega \cdot I_n$$

$$V_n = V'n \cdot \frac{L_S}{L_S + L_F}.$$

En appliquant ce raisonnement à chaque harmonique et en faisant le calcul de la distorsion totale, il apparaît que si le taux de distorsion en tension



L_F : inductance de filtrage du redresseur
 L_S : inductance totale de source (générateur + câblage)
 e : source de tension parfaite
 D, D' : taux de distorsion en tension

fig. 12 : découplage harmonique par utilisation d'une inductance additionnelle.

mesuré au point B est D', le taux de distorsion en tension en A est :

$$D = D' \cdot \frac{L_s}{L_s + L_F}$$

Rappelons que :

$$U_{ccs} = \frac{L_s \cdot \omega \cdot I_n}{V_n}$$

$$U_{ccf} = \frac{L_F \cdot \omega \cdot I_n}{V_n}$$

V_n : valeur efficace de la tension simple
A titre d'exemple, si L_s est telle que $U_{ccs} = 2\%$ et L_F telle que $U_{ccf} = 6\%$, leur somme $U_{ccs} + U_{ccf}$ est égale à 8% .

Pour un angle de retard α égal à 30° , la courbe de la figure 11 indique un taux de distorsion de 19% .

Le taux de distorsion au point A est donc :

$$D = 19\% \times \frac{2}{8} = 4,75\%$$

Sans la présence de l'inductance L_F , le taux de distorsion aurait été celui relatif à L_s seule, soit $U_{ccs} = 2\%$, ce qui donne sur la courbe de la figure 12

$$D = 10\%$$

La mise en place de l'inductance L_F a permis, dans ce cas, de réduire le taux de distorsion de la tension d'un facteur supérieur à 2 au niveau des autres utilisations.

Application

Une ASI, de puissance 300 kVA, alimente une charge de 250 kVA à $\cos \varphi = 0,8$; son rendement est de 0,92 et le facteur de puissance de son redresseur est : $\lambda = 0,82$.

La puissance apparente appelée par le redresseur est donc :

$$\frac{250 \times 0,8}{0,92 \times 0,82} = 265 \text{ kVA}$$

Le redresseur est alimenté par un transformateur de 630 kVA ; $U_{ccs} = 4\%$ et il est associé à une inductance correspondant à un U_{ccf} de

12% et dimensionnée pour une puissance du redresseur de 350 kVA. Compte-tenu des taux de charge du transformateur et du redresseur,

$$U_{ccs} \text{ devient : } 4\% \times \frac{265}{630} = 1,7\%$$

$$U_{ccf} \text{ devient : } 12\% \times \frac{265}{350} = 9,1\%$$

Si en moyenne les thyristors fonctionnent avec un angle de retard α de 20° , la figure n° 12 permet de déterminer le taux de distorsion :

$$D = 18,8\%$$

$$(\alpha = 20^\circ ; U_{cc} = 10,8\%)$$

d'où un taux de distorsion aux bornes du transformateur de :

$$D = 18,8\% \times \frac{1,7\%}{10,9\%} = 2,9\%$$

utilisation d'un redresseur à deux ponts

(cf. fig. 13)

Le principe consiste à utiliser un transformateur à deux secondaires délivrant des tensions décalées de 30° entre elles, chacun de ces secondaires alimentant 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 chacun des redresseurs au primaire du transformateur et le calcul montre que les harmoniques de rang $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés. C'est le cas en

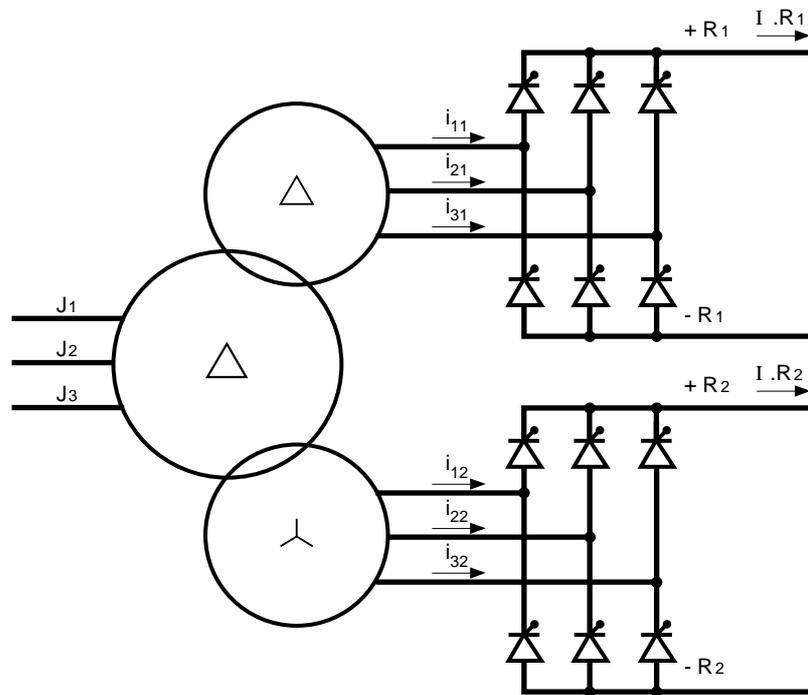


fig. 13 : schéma de principe d'un redresseur à deux ponts décalés.

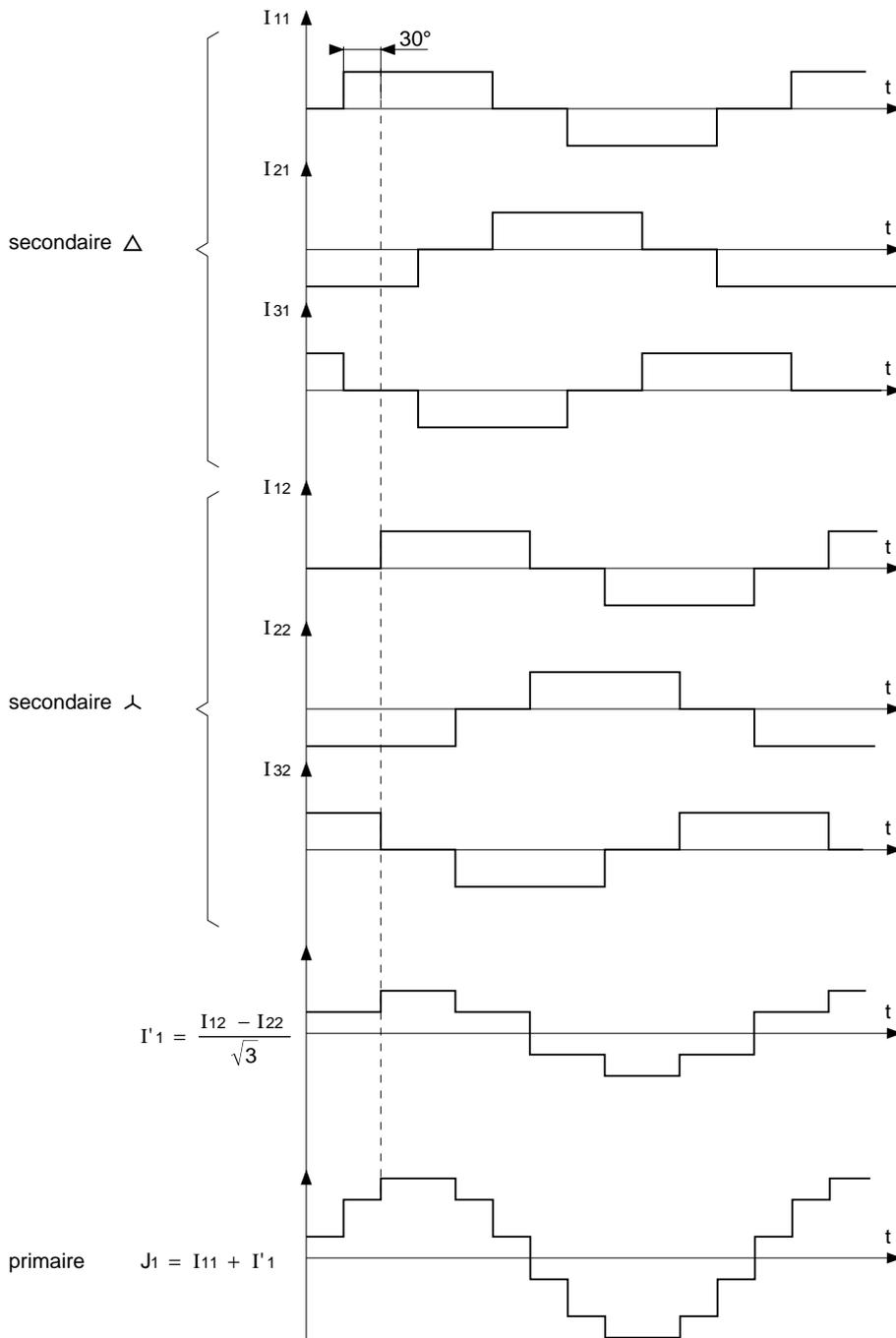


fig. 14 : forme des courants absorbés par le redresseur et résultante au primaire du transformateur à deux secondaires.

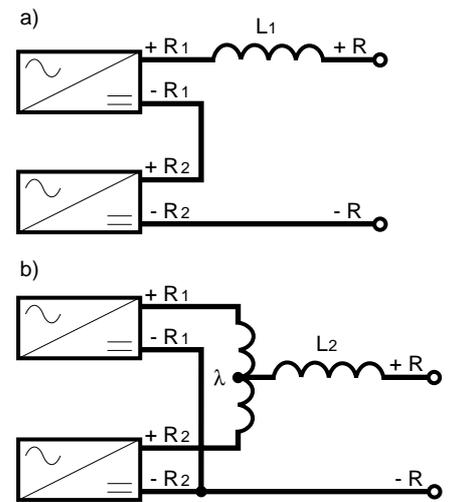
particulier pour les harmoniques 5 et 7 dont les amplitudes théoriques sont les plus importantes. Les harmoniques 11 et 13 sont conservés tandis que les harmoniques 17 et 19 sont éliminés. Les harmoniques restants sont donc de rang $12k \pm 1$ avec k entier naturel.

La figure n° 14 donne le courant absorbé par le primaire du transformateur à partir des courants délivrés par les deux secondaires.

Le courant de ligne a une forme beaucoup plus proche d'une sinusoïde que le courant obtenu avec un seul redresseur.

Les deux redresseurs peuvent être connectés en série ou en parallèle (cf. fig. 15).

Dans le cas de la mise en parallèle, les tensions instantanées délivrées par chacun des deux redresseurs n'étant pas égales (puisqu'elles sont décalées de 30 degrés), il est nécessaire de rajouter une inductance à point milieu pour conserver un débit continu pour chaque redresseur. En l'absence de



L_1, L_2 : inductances de filtrage du continu
 λ : inductance de découplage à point milieu

fig. 15 : montage en série (a) ou en parallèle (b) des deux redresseurs.

cette inductance, la conduction serait assurée à chaque instant par celui des redresseurs délivrant la tension la plus élevée.

Il existe plusieurs variantes (brevetées par Merlin Gerin) du schéma de la figure 13 (cf. fig. 16) qui conduisent au même résultat au niveau des harmoniques.

Taux de distorsion en courant

Avec l'hypothèse d'une impédance amont au redresseur nulle et d'un courant continu parfaitement lissé, la valeur efficace de chaque harmonique

de courant est de la forme : $I_n = \frac{I_1}{n}$

avec $n = 12k \pm 1$.

Le taux de distorsion théorique est donc :

$$D\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (I_{12k+1}^2) + (I_{12k-1}^2)}}{I_1} \cdot 100$$

soit $D \approx 15\%$ ce qui représente la moitié de la valeur obtenue avec un seul redresseur (cf. début du § 2).

Taux de distorsion de la tension

Le taux de distorsion de la tension dépend de l'impédance de source.

Pour une impédance de source très faible (somme des impédances amont au(x) redresseur(s)), le rapport entre les

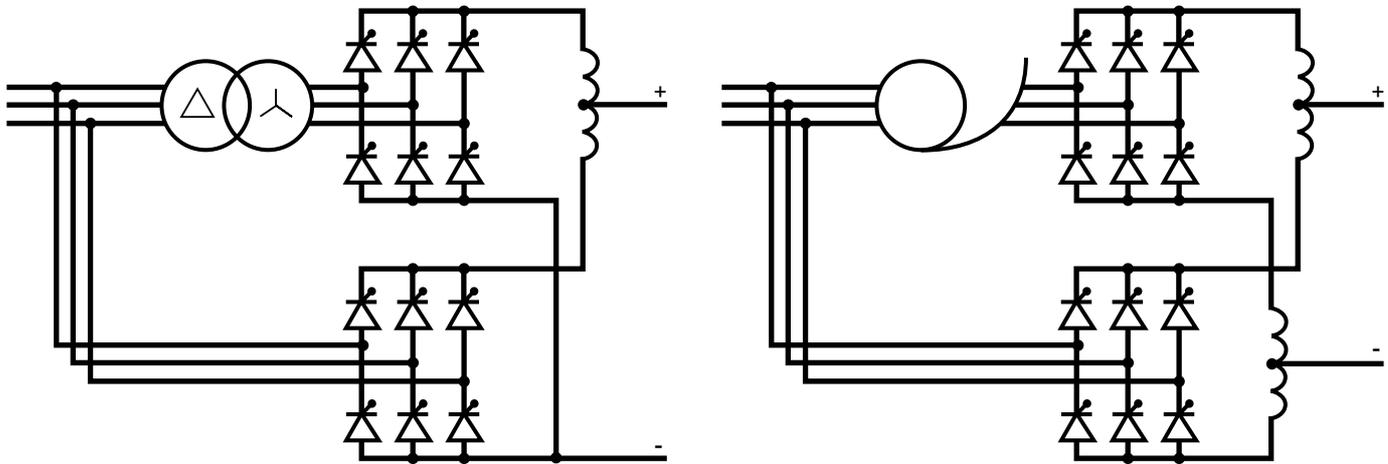
taux de distorsion obtenus avec le montage à deux redresseurs et celui à un

seul redresseur est de : $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,7$.

Pour une impédance de source plus élevée, le gain est plus important car les harmoniques de rangs élevés diminuent rapidement lorsque l'impédance de source augmente. Il reste toutefois modeste et en pratique un rapport de 0,5 à l'avantage du double pont, est à retenir.

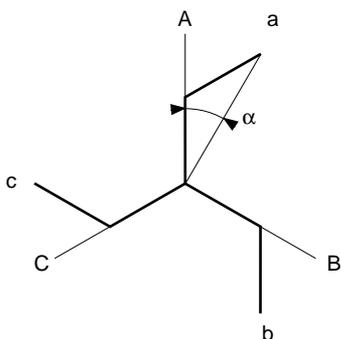
A titre d'exemple :

■ pour un angle de retard α de 30 degrés, le rapport entre les deux



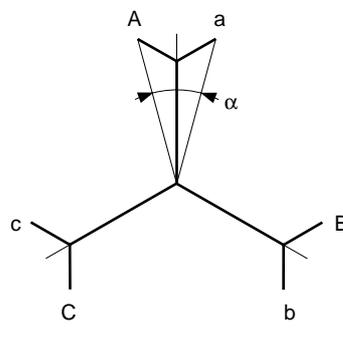
a) montage avec transformateur de puissance

b) montage avec autotransformateur

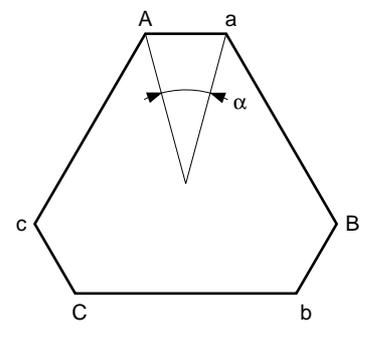


étoile simple

c) différents couplages pour l'autotransformateur



double étoile



polygonal

fig. 16 : montages permettant d'obtenir un déphasage de 30° et les différents couplages de l'autotransformateur.

taux de distorsion vaut 0,66 pour $U'_{cc} = 8 \%$ et 0,55 pour $U'_{cc} = 16 \%$;
 ■ pour $\alpha = 0$ les rapports sont respectivement de 0,53 et 0,37.

Ce rapport entre les taux de distorsion ne tient pas compte de l'inductance du système déphaseur.

redresseur à plus de deux ponts

(cf. fig. 17)

L'idée de base est ici d'augmenter le nombre de secondaires du transformateur avec des déphasages relatifs dépendant du nombre de secondaires retenus dans le but d'éliminer d'autres harmoniques de courant.

Montage avec 3 redresseurs

Pour ce type de montage, les déphasages doivent être tels que :

- $\alpha_1 = 0$ degré,
- $\alpha_2 = 20$ degrés,
- $\alpha_3 = 40$ degrés.

Dans ce cas les seuls harmoniques restants sont de rang $6k \pm 1$ avec k multiple de 3, soit $18k \pm 1$.

Les premiers harmoniques de courant sont donc les harmoniques 17 et 19 et les suivants 35 et 37.

Montage avec 4 redresseurs

Dans ce cas, les déphasages sont les suivants :

- $\alpha_1 = 0$ degré,
- $\alpha_2 = 15$ degrés,
- $\alpha_3 = 30$ degrés,
- $\alpha_4 = 45$ degrés.

Les seuls harmoniques restants sont alors de rang $24k \pm 1$.

Les premiers harmoniques sont donc les harmoniques 23 et 25 et les suivants 47 et 49.

Ces montages sont intéressants dans la mesure où ils permettent d'obtenir des taux de distorsion en courant et en tension relativement faibles.

Ils ont l'inconvénient d'être complexes et coûteux et, en conséquence, leur utilisation est réservée aux équipements de forte puissance.

A titre d'exemple, l'électrolyse de l'aluminium, qui utilise le courant continu avec des puissances de plusieurs MW, fait appel à des montages qui ont jusqu'à 72 phases !

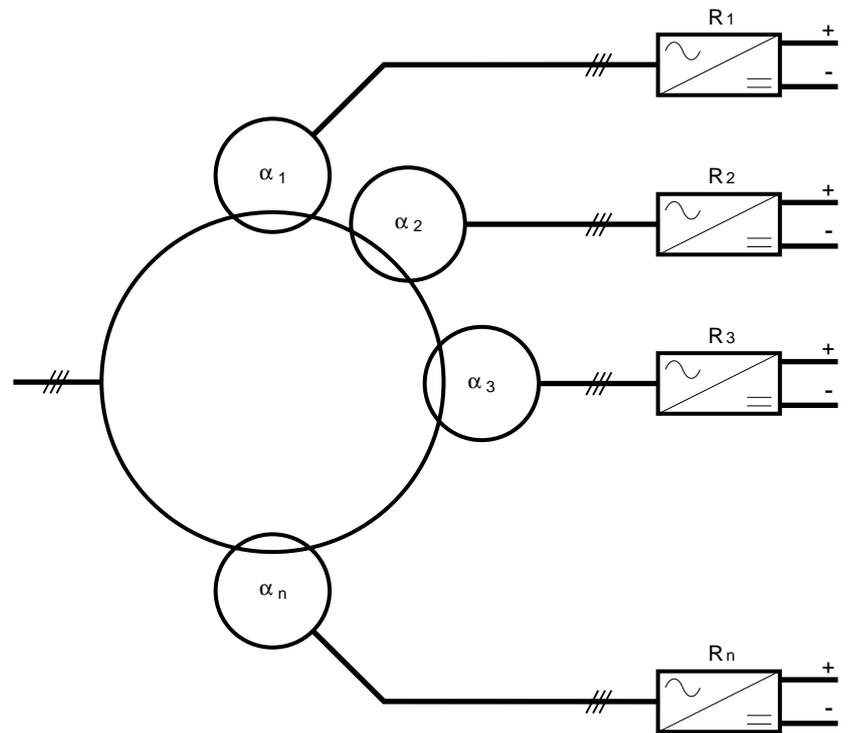


fig. 17 : exemple de n redresseurs.

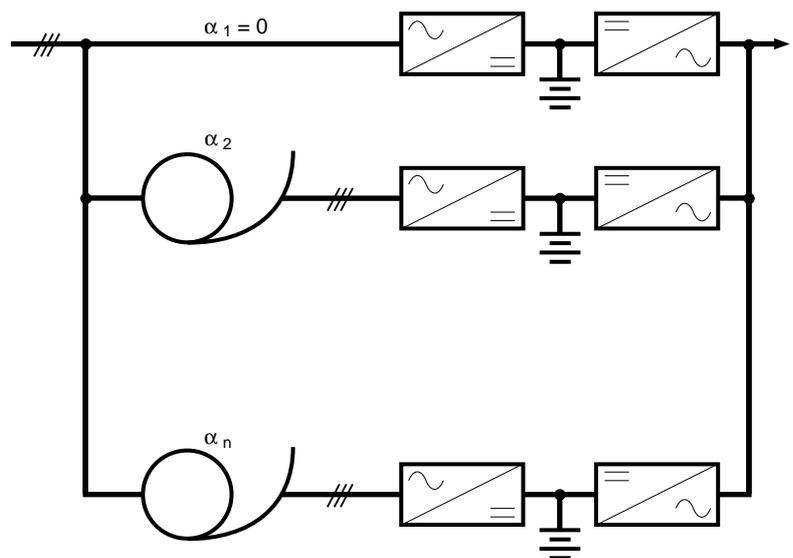


fig. 18 : principe du phase shifting.

Cas particulier du montage appelé "phase shifting"

(cf. fig. 18)

Lorsque plusieurs ASI sont utilisées en parallèle, celles-ci se répartissent le

courant de charge, et les courants prélevés par chacun de leur redresseur ont des amplitudes identiques. Il est alors possible d'alimenter les redresseurs par l'intermédiaire

d'autotransformateurs créant les déphasages voulus en fonction du nombre des redresseurs (au lieu d'utiliser des montages avec des transformateurs).

Les autotransformateurs utilisés peuvent être de même type que ceux de la figure n° 16.

Pour des raisons économiques, c'est surtout le couplage polygonal qui est utilisé. L'inconvénient principal de cet artifice réside dans le fait que lorsqu'une des ASI est arrêtée momentanément, le taux d'harmoniques augmente.

Le tableau de la figure 19 indique le contenu harmonique des montages principaux avec tous les redresseurs en service et avec un redresseur arrêté.

utilisation d'un filtre passif d'harmoniques

Le filtre est accordé sur une fréquence particulière.

Son efficacité est maximale à cette fréquence et il faut utiliser plusieurs filtres pour atténuer fortement plusieurs harmoniques.

La mise en œuvre des filtres passifs est toujours délicate du fait du risque de résonance.

(Voir à ce sujet, le Cahier Technique n° 152 : "Les perturbations harmoniques dans les réseaux et leur traitement").

Filtre utilisé pour les ASI de forte puissance par Merlin Gerin

La figure n° 20 montre le schéma de principe équivalent pour une phase.

La branche parallèle du filtre est constituée d'un circuit accordé sur l'harmonique 5 qui est le plus important. La branche série du filtre comporte une inductance destinée à réaliser un découplage de la branche parallèle vis-à-vis de la source.

En appelant Z_{pn} et Z_{sn} les impédances des branches parallèle et série du filtre pour l'harmonique de rang n , et si le courant généré par le redresseur pour ce rang est I'_{hn} , le courant fourni par la source est :

$$I_{hn} = I'_{hn} \cdot \frac{Z_{pn}}{Z_{pn} + Z_{sn}}$$

(cf. fig. 21).

■ pour l'harmonique 5, l'impédance parallèle est nulle.

montage utilisé	nbre de redresseurs en service	harmoniques							
		H5	H7	H11	H13	H17	H19	H23	H25
2 redresseurs	2	0	0	1	1	0	0	1	1
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3 redresseurs	3	0	0	0	0	1	1	0	0
	2	1/2	1/2	1/2	1/2	1	1	1/2	1/2
4 redresseurs	4	0	0	0	0	0	0	1	1
	3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1

fig. 19 : évolution du contenu harmonique du courant pour les principaux montages.

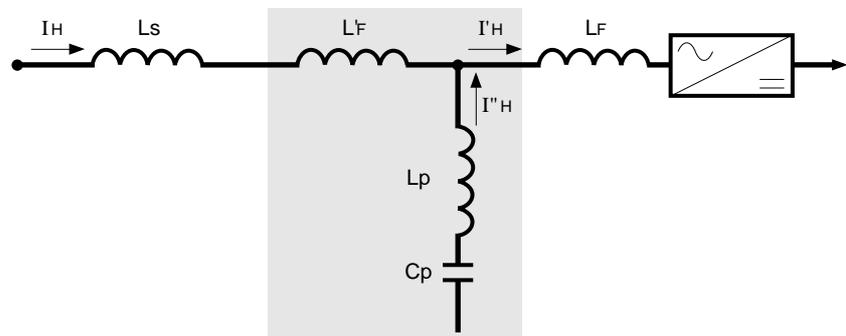


fig. 20 : schéma de principe du filtre passif d'harmoniques.

Tout le courant d'harmonique 5 traverse donc la branche parallèle du filtre et cet harmonique n'affecte plus les autres utilisations.

■ pour l'harmonique 7, du fait de la proximité de l'accord, l'impédance parallèle est encore faible et une grande partie de cet harmonique est aussi éliminée.

■ enfin, pour les harmoniques de rangs élevés, l'impédance parallèle du filtre est très proche de celle de son inductance L_p : le filtre fonctionne en diviseur de courant.

Pour les harmoniques de rangs élevés :

$$I_{hn} = I'_{hn} \cdot \frac{L_p}{L_p + L_s + L'_F}$$

si L_p est choisi de façon à avoir :

$$L_p \approx L_s + L'_F, \text{ alors}$$

$$I_{hn} = \frac{1}{2} \cdot I'_{hn}$$

Taux global de distorsion en tension

Le calcul détaillé du taux de distorsion en tension, obtenu à la sortie de la source, dépasse le cadre de ce cahier ; voici cependant un exemple :

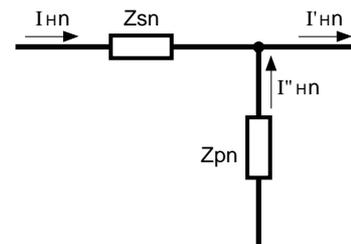


fig. 21 : schéma équivalent du filtre pour les harmoniques.

■ si $L'_F = L_F$ avec $U_{ccf} = 12\%$ et

■ si L_p correspond à $U_{ccp} = 15\%$, le gain par rapport à la mise en place de l'inductance L'_F seule est au moins de 3 quelle que soit la valeur de l'impédance de source.

Les figures n° 22 et n° 23 montrent la forme des courants en ligne, sans filtre, puis avec filtre, ainsi que les spectres de ces courants pour un redresseur comportant une inductance d'entrée et une inductance du filtre telle que

$L'_F = L_F$ avec $U_{ccf} = 10\%$.

Le redresseur est alimenté par une source telle que $U_{ccs} = 2\%$.

Pour un harmonique de courant de rang n, la tension V_{Hn} développée à travers l'impédance de source est :

$$V_{Hn} \% = U_{ccs} \% \cdot n \cdot \frac{I_{Hn}}{I_1}$$

or,

$$D \% = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{Hn}^2}$$

d'où :

$$D \% = U_{ccs} \% \cdot n \cdot \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{I_{Hn}}{I_1}\right)^2}$$

Avec les valeurs de la figure n° 22 les taux de distorsion à la sortie de la source sont respectivement de 4 % sans filtre et 1 % avec filtre.

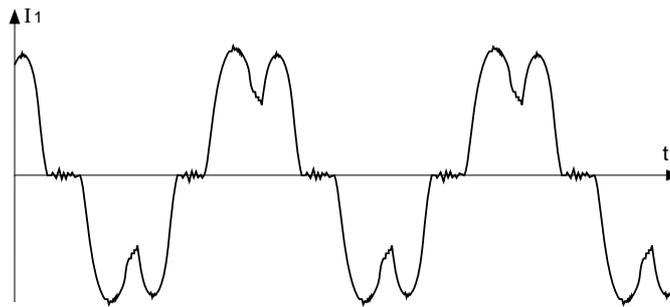
A titre de comparaison, il est à noter qu'avec un redresseur à deux ponts avec la même inductance d'entrée, les harmoniques 5, 7, 17 et 19 sont éliminés ce qui conduit à un taux de distorsion à la sortie de la source égal à 1,9 %.

Le filtre d'harmoniques est ici pratiquement deux fois plus efficace que l'emploi du montage double pont. De plus c'est une solution moins coûteuse qui peut être mise en œuvre après la mise en service.

Autre particularité du filtre d'harmoniques

La présence de la branche parallèle du filtre accordée sur l'harmonique 5 fait apparaître un courant capacitif à la fréquence du fondamental.

Ce courant capacitif améliore le $\cos \varphi$ du redresseur.

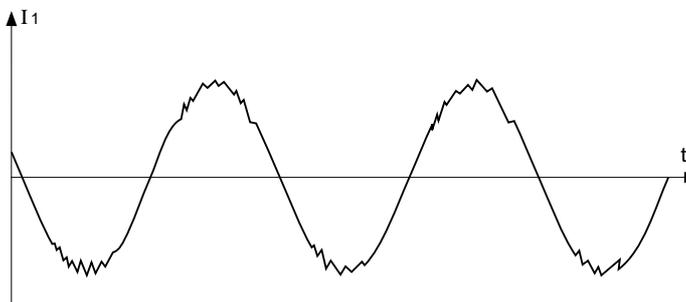


spectre du courant

rang	I_{Hn} / I_1
H5	33 %
H7	2,7 %
H11	7,3 %
H13	1,6 %
H17	2,6 %
H19	1,1 %
H23	1,5 %
H25	1,3 %

taux global de distorsion du courant \approx 35 %

fig. 22 : courant ligne d'un redresseur sans filtre d'harmoniques.



spectre du courant

rang	I_{Hn} / I_1
H5	2,1 %
H7	1,4 %
H11	3,6 %
H13	0,7 %
H17	1 %
H19	0,7 %
H23	0,6 %
H25	0,5 %

taux global de distorsion du courant $<$ 5 %

fig. 23 : courant ligne d'un redresseur avec filtre d'harmoniques.

4. conclusion et perspectives

Les classiques redresseurs à thyristors des ASI sont des sources de perturbations harmoniques et détériorent le facteur de puissance de l'installation.

Ces pollutions sont acceptables tant que la puissance de l'ASI est faible devant la puissance de court-circuit du réseau.

Lorsque le taux de distorsion en tension dépasse les valeurs acceptables (de l'ordre de quelques %), il est nécessaire de prendre des mesures correctives.

La solution la plus simple et la plus commune consiste à placer en série une inductance qui réalise un découplage harmonique.

Lorsque cette mesure n'est pas suffisante, l'utilisation de redresseurs décalés ou de filtres passifs permet de

ramener ces perturbations à un niveau acceptable.

Ces solutions sont aujourd'hui parfaitement maîtrisées et largement utilisées.

La figure n° 24 présente la synthèse des avantages et inconvénients des diverses solutions.

Dans un avenir qui peut être proche, la multiplication des équipements pollueurs, l'évolution de la normalisation et les exigences des distributeurs d'énergie devraient conduire à l'utilisation de redresseurs propres, (ce qui est déjà réalisé pour les appareils monophasés grâce à la technique du prélèvement sinusoïdal).

Par ailleurs un convertisseur utilisant la technique de la modulation de largeur d'impulsions peut, en utilisant une

régulation adaptée, se comporter comme un filtre actif dédié à une charge polluante particulière ou bien à l'ensemble d'une installation, le principe étant comparable à celui de la dépollution acoustique (émission de "sons" en opposition de phase avec les sons à inhiber).

Ces mêmes convertisseurs peuvent également, avec une autre stratégie de régulation, réaliser une compensation auto-adaptative du $\cos \varphi$ de l'installation.

Pour que ces dispositifs techniquement maîtrisés soient industrialisés, il faut que leur coût soit acceptable par rapport aux solutions classiques.

Les principes de ces convertisseurs et leurs possibilités seront abordés dans un prochain Cahier Technique.

type de montage	schéma	observations
a) aucun interface réducteur		<ul style="list-style-type: none"> ■ acceptable si la puissance appelée est faible devant la puissance de court-circuit du réseau.
b) inductance série		<ul style="list-style-type: none"> ■ simple, fiable ■ utilisable dans la grande majorité des cas ■ l'inductance peut être rajoutée après la mise en exploitation ■ économique
c) double pont et transformateur à deux secondaires		<ul style="list-style-type: none"> ■ complexe (équilibrage des tensions, des I_{cc}, des courants dans les redresseurs) ■ à prévoir à l'origine de l'étude ■ coûteux
d) double pont avec autotransformateur		<ul style="list-style-type: none"> ■ la solution pour la mise en parallèle des ASI en redondance active ■ vis-à-vis du montage C <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> même efficacité et inconvénients <input type="checkbox"/> pertes plus faibles <input type="checkbox"/> plus économique
e) filtre passif		<ul style="list-style-type: none"> ■ simple, fiable ■ le plus performant ■ peut être installé après la mise en exploitation ■ plus économique que la solution à deux redresseurs

fig. 24 : comparaison des solutions anti-harmoniques.

5. bibliographie

Normes

- CEI 146-4 : Convertisseurs à semi-conducteur 4ème partie : Méthode de spécification des performances et procédures d'essai des ASI.
- CEI 555-2 : Perturbations produites dans les réseaux d'alimentation par les appareils électrodomestiques et les équipements analogues.
- CEI 1000-2-2 : Compatibilité électromagnétique (CEM)
2ème partie : Environnement
Section 2 : Niveaux de compatibilité.

Cahiers Techniques Merlin Gerin

- Les perturbations harmoniques dans les réseaux industriels et leur traitement,
Cahier Technique n° 152 -
P. ROCCIA et N. QUILLON.
- Onduleurs et harmoniques
(cas des charges non linéaires),
Cahier Technique n° 159 -
J.N. FIORINA.

Publications diverses

- Directive du 25 juillet 1985
référéncée 85/374/CEE.
- Electra n° 77 de juillet 1991.
- Electra n° 123 de mars 1989.