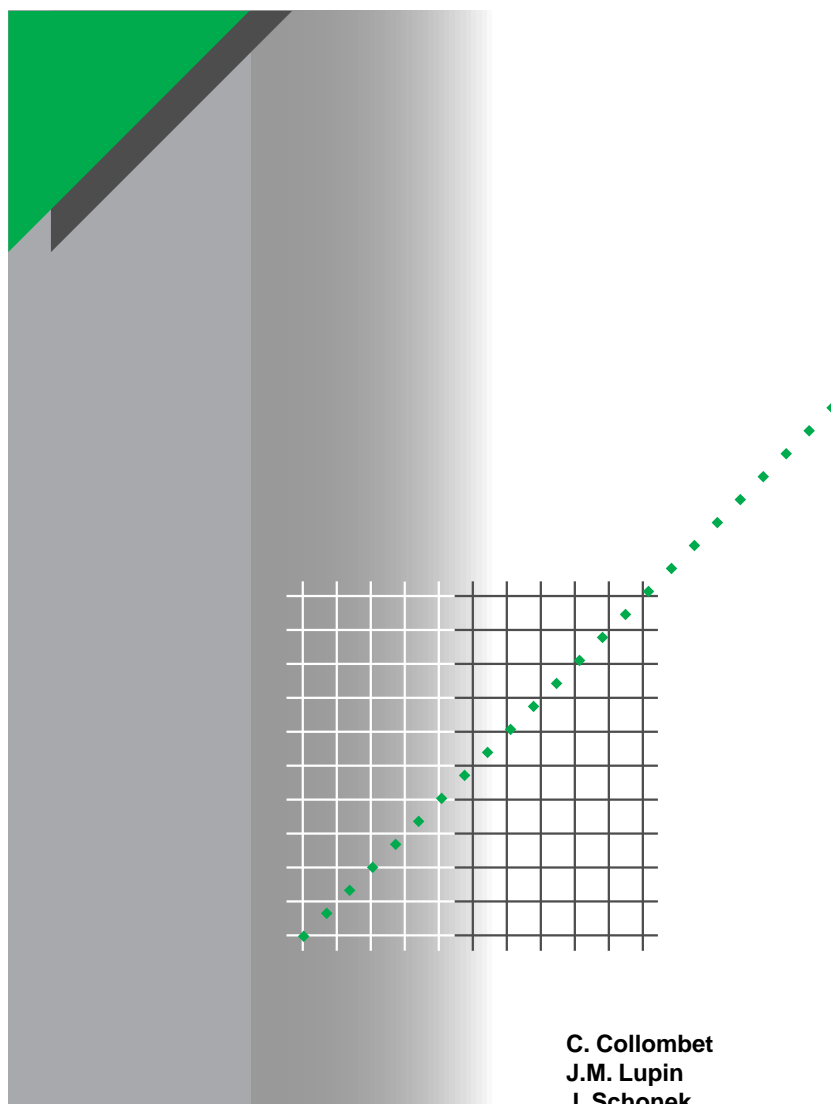


Cahier technique n° 152

Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

**C. Collombet
J.M. Lupin
J. Schonek**

Les Cahiers Techniques constituent une collection d'une centaine de titres édités à l'intention des ingénieurs et techniciens qui recherchent une information plus approfondie, complémentaire à celle des guides, catalogues et notices techniques.

Les Cahiers Techniques apportent des connaissances sur les nouvelles techniques et technologies électrotechniques et électroniques. Ils permettent également de mieux comprendre les phénomènes rencontrés dans les installations, les systèmes et les équipements.

Chaque Cahier Technique traite en profondeur un thème précis dans les domaines des réseaux électriques, protections, contrôle-commande et des automatismes industriels.

Les derniers ouvrages parus peuvent être téléchargés sur Internet à partir du site Schneider Electric.

Code : <http://www.schneider-electric.com>

Rubrique : **Le rendez-vous des experts**

Pour obtenir un Cahier Technique ou la liste des titres disponibles contactez votre agent Schneider Electric.

La collection des Cahiers Techniques s'insère dans la « Collection Technique » de Schneider Electric.

Avertissement

L'auteur dégage toute responsabilité consécutive à l'utilisation incorrecte des informations et schémas reproduits dans le présent ouvrage, et ne saurait être tenu responsable ni d'éventuelles erreurs ou omissions, ni de conséquences liées à la mise en œuvre des informations et schémas contenus dans cet ouvrage.

La reproduction de tout ou partie d'un Cahier Technique est autorisée après accord de la Direction Scientifique et Technique, avec la mention obligatoire : « Extrait du Cahier Technique Schneider Electric n° (à préciser) ».

Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement



Christian COLLOMBET

Ingénieur INPG (Institut National Polytechnique de Grenoble), 1994, il effectue un DEA en collaboration avec Schneider Electric sur le calcul des courants de court-circuit dans les réseaux industriels. En 1995, il rejoint la Direction Scientifique et Technique où il mène des études sur le fonctionnement des réseaux électriques et leur interaction avec les matériels et équipements.



Jean-Marc LUPIN

Ingénieur diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Electriciens de Grenoble en 1984. En 1985, il rejoint Schneider Electric, au sein du Service Technique de Rectiphase où il participe activement à la mise au point des condensateurs HT, puis au développement des batteries de compensation et des filtres d'harmoniques. Il occupe aujourd'hui au sein de l'activité compensation d'énergie et filtrage un poste d'expert technique chargé des essais, de la normalisation et de l'anticipation.



Jacques SCHONEK

Ingénieur ENSEEIHT et Docteur-Ingénieur de l'Université de Toulouse, a participé de 1980 à 1995 à la conception des variateurs de vitesse Telemecanique. Il a été ensuite gérant de l'activité Filtrage d'Harmoniques et actuellement responsable Applications et Réseaux Electrotechniques au sein du BE Avancé de la Division Basse Tension de Puissance.

Ont également participé à la réédition 1999 :

Noël QUILLION, à l'origine de la conception de ce Cahier Technique, actuellement au Département « Protection et Contrôle des Réseaux » ;

Bruno LUSSON, spécialiste des harmoniques à l'entité « Support Services France ».

Lexique

Symboles :

BP	bande passante d'un filtre shunt résonant
C	capacité des condensateurs. Les condensateurs en général
D (ou TDH)	distorsion (ou taux de distorsion) harmonique
δ	angle de perte d'un condensateur
f_1	fréquence fondamentale
f_{ar}	fréquence de l'anti-résonance
f_n	fréquence de la composante harmonique
f_r	fréquence de résonance
φ_n	déphasage de la composante harmonique au temps initial.
I_n	courant efficace de la composante harmonique de rang n
j	opérateur complexe tel que $j^2 = -1$
L	inductance
Lcc	inductance de court-circuit d'un réseau, vue d'un point spécifié, au sens du théorème de THEVENIN
n	rang de la composante harmonique
n_{ar}	rang de l'antirésonance, rapport de la fréquence de l'antirésonance à la fréquence fondamentale
n_r	rang de la résonance, rapport de la fréquence de la résonance à la fréquence fondamentale
k	entier positif
p	nombre de bras du redresseur
p_1	pertes du filtre dues uniquement au courant fondamental
p_n	pertes du filtre dues uniquement aux courants harmoniques
P (W)	puissance active
q	facteur de qualité d'une inductance
Q	facteur de qualité d'un filtre
Q (var)	puissance réactive
r	résistance
R	résistance (ou partie réelle de l'impédance)
spectre	ensemble des harmoniques en valeur relative par rapport au fondamental, en un point spécifié
Scc	puissance de court-circuit d'un réseau, en un point spécifié
T	période d'une grandeur alternative
U	tension efficace entre phases
V_n	tension simple efficace de la composante harmonique de rang n
X	réactance
X_0	inductance ou impédance caractéristique d'un filtre
X_{cc}	réactance de court-circuit d'un réseau, vue d'un point spécifié, au sens du théorème de THEVENIN
Y_0	amplitude de la composante continue
Y_n	valeur efficace de la composante harmonique de rang n
Z	impédance

Sigles :

CIGRE	Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques
CEI	Commission Electrotechnique Internationale

Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbations harmoniques tels que : fours à arc, convertisseurs statiques de puissance, ou encore certains types d'éclairage, etc.

Dans ce but, ce document est une contribution à une meilleure connaissance des problèmes d'harmoniques, de leurs causes, et des solutions les plus couramment pratiquées.

Sommaire

1 Les grandeurs harmoniques		p. 4
2 Principales perturbations provoquées par les courants et tensions harmoniques	2.1 Effets instantanés	p. 6
	2.2 Effets à terme	p. 6
3 Limites acceptables, recommandations, normes	3.1 Valeurs données à titre indicatif	p. 8
	3.2 Limites normalisées	p. 8
4 Les générateurs de grandeurs électriques harmoniques, ou pollueurs	4.1 Les convertisseurs statiques sur réseau triphasé	p. 9
	4.2 L'éclairage	p. 10
	4.3 Les fours à arc	p. 11
	4.4 Les inductances saturées	p. 11
	4.5 Les machines tournantes	p. 12
	4.6 Modèle utilisé dans les calculs	p. 12
	4.7 Réalisation des calculs	p. 12
5 Réseau avec pollueur et condensateurs, problème d'amplification par résonance	5.1 En l'absence de batteries de condensateurs	p. 13
	5.2 En présence d'une batterie de condensateurs	p. 14
6 L'inductance antiharmonique		p. 17
7 Les filtres	7.1 Le shunt résonant	p. 18
	7.2 Les filtres amortis	p. 19
	7.3 Les filtres actifs	p. 21
8 Exemple d'étude d'un réseau simplifié	8.1 Montage de la batterie de condensateurs	p. 22
	8.2 Montage d'un dispositif inductance antiharmonique et condensateurs	p. 23
	8.3 Montage d'un filtre shunt résonant sur le rang 5 et d'un filtre amorti sur le rang 7	p. 24
9 Conclusion		p. 25
Bibliographie		p. 26

1 Les grandeurs harmoniques

Voici des définitions dont la connaissance est nécessaire pour comprendre l'ensemble des développements de ce Cahier Technique. Les lecteurs déjà informés pourront aborder directement le chapitre suivant.

La variation en fonction du temps, des grandeurs électriques courants et tensions des réseaux industriels alternatifs, s'éloigne significativement de la sinusoïde pure (cf. **fig. 1**).

La variation est en fait composée d'un certain nombre de sinusoïdes de fréquences différentes, comprenant entre autres, une sinusoïde à fréquence industrielle dite sinusoïde fondamentale ou plus simplement : le fondamental.

« Grandeur harmonique » ou simplement « harmonique »

C'est une des composantes sinusoïdales de la variation de la grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental.

Rang de l'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1}$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1.

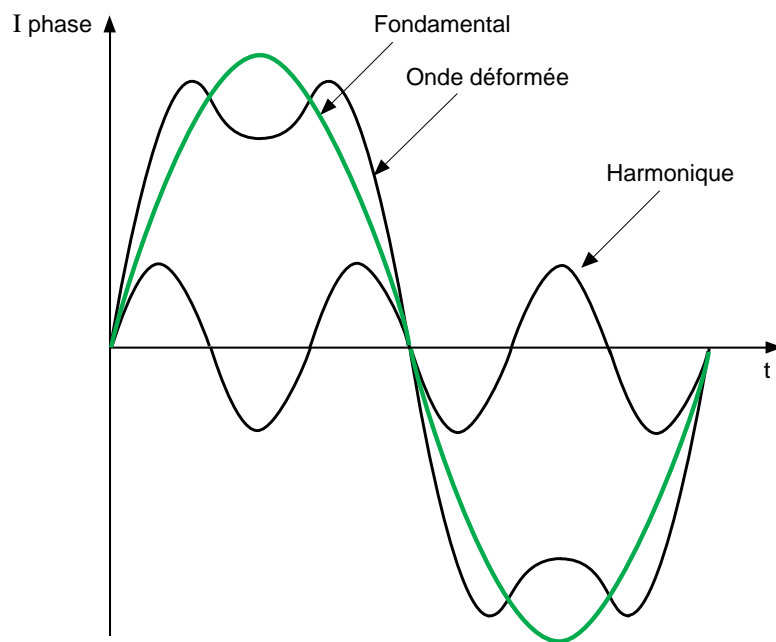


Fig.1 : image d'une onde déformée.

Spectre

C'est l'histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang (cf. **fig. 2**).

Expression de la grandeur déformée

Le développement en série de FOURIER de tout phénomène périodique est de la forme :

$$y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

où :

- Y_0 = amplitude de la composante continue, généralement nulle en distribution électrique en régime permanent,
- Y_n = valeur efficace de la composante de rang n ,
- φ_n = déphasage de la composante harmonique au temps initial.

L'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence. Selon les normes, on prend en considération les harmoniques jusqu'au rang 40.

Valeur efficace d'une grandeur déformée

La valeur efficace de la grandeur déformée conditionne les échauffements, donc habituellement les grandeurs harmoniques sont exprimées en valeurs EFFICACES.

Pour une grandeur sinusoïdale, la valeur efficace est la valeur maximale divisée par racine de deux.

Pour une grandeur déformée et, en régime permanent, l'énergie dissipée par effet JOULE est la somme des énergies dissipées par chacune des composantes harmoniques, soit :

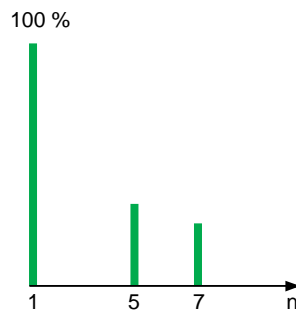


Fig. 2 : l'amplitude est souvent donnée, relative à celle du fondamental.

$$RI^2 t = RI_1^2 t + RI_2^2 t + \dots + RI_n^2 t$$

$$\text{d'où : } I^2 = I_1^2 + \dots + I_n^2$$

$$\text{ou encore : } I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

dans la mesure où la résistance est considérée comme une constante.

La mesure de la valeur efficace de la grandeur déformée s'effectue soit directement par des appareils dits à vraie valeur efficace ou thermiques ou à l'aide d'analyseurs de spectre.

Taux individuel et taux de distorsion

Les taux individuels et la distorsion en tension sont significatifs de la pollution d'un réseau.

■ « Taux individuel »

Il donne une mesure de l'importance de chaque harmonique par rapport au fondamental.

Le taux individuel est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique de rang n à celle du fondamental.

Exemple : taux de I_n en % = $100 (I_n/I_1)$ (l'indice n ne signifiant pas nominal).

■ « Taux global de distorsion » ou simplement « distorsion »

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques ; c'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle de la valeur efficace,

■ soit du fondamental seul (CEI 61000-2-2) où $D > 0$ peut être très grand :

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{Y_1}$$

■ soit (plus rarement) de la grandeur déformée mesurée, où $0 < D < 1$:

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} Y_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} Y_n^2}}$$

Sauf indications contraires, nous utiliserons la définition suivant CEI 61000-2-2, qui correspond au rapport entre la charge harmonique et le courant non déformé à fréquence industrielle.

2 Principales perturbations provoquées par les courants et tensions harmoniques

Les tensions et courants harmoniques superposés à l'onde fondamentale conjuguent leurs effets sur les appareils et équipements utilisés.

Ces grandeurs harmoniques ont des effets différents selon les récepteurs rencontrés :

- soit des effets instantanés,
- soit des effets à terme dus aux échauffements.

2.1 Effets instantanés

Sur les systèmes électroniques, les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent le passage à zéro de la tension (voir CEI 60146-2 et Cahier Technique Schneider Electric n° 141).

Les compteurs d'énergie à induction présentent des erreurs supplémentaires en présence d'harmoniques : par exemple un compteur classe 2 donnera une erreur supplémentaire de 0,3 % avec un taux de 5 % d'harmonique 5 sur le courant et la tension.

Les récepteurs de télécommande centralisée à fréquence musicale utilisée par les distributeurs d'énergie peuvent être perturbés par des tensions harmoniques de fréquence voisine de celle utilisée par le système. Nous évoquerons plus loin d'autres causes de perturbation de ces relais liées aux impédances harmoniques de réseau.

Vibrations, bruit

Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Des couples mécaniques pulsatoires, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes.

Perturbations induites sur les lignes à courants faibles (téléphone, contrôle-commande)

Des perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courants faibles chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courants et tensions déformés.

Les paramètres tels que : longueur du cheminement parallèle, distance entre les deux circuits, fréquence des harmoniques (le couplage augmente avec la fréquence), sont à prendre en compte.

2.2 Effets à terme

Hormis la fatigue mécanique des matériaux due aux vibrations, l'effet à terme est l'échauffement.

Echauffement des condensateurs

Les pertes, causes de l'échauffement, sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans le diélectrique.

Elles sont en première approximation proportionnelles au carré du courant efficace.

Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence de tensions harmoniques.

Ces pertes sont définies par l'angle de perte δ du condensateur, angle dont la tangente est le rapport entre les pertes et l'énergie réactive

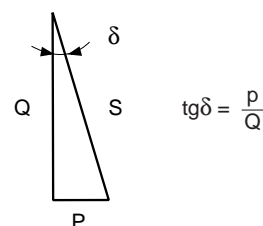


Fig. 3 : triangle des puissances P , Q , S d'un condensateur.

produite (cf. **fig. 3**), on peut citer des $\operatorname{tg} \delta$ de l'ordre de 10^{-4} du fondamental. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs

■ pertes supplémentaires dans les machines, dans leur stator (cuivre et fer), et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) par suite des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Notons que les mesures rotoriques (température, courants induits), sont difficiles, sinon impossibles,

■ pertes supplémentaires des transformateurs dues à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), à l'hystérésis et aux courants de FOUCAULT (dans le circuit magnétique).

Echauffement des câbles et des équipements

Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, d'où une élévation de température. Parmi les causes des pertes supplémentaires on peut citer :

- une augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée ;
- l'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau ;
- l'élévation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable ;

■ des phénomènes de proximité, de gaines, d'écrans mis à la terre aux deux extrémités, etc. Les calculs en régime permanent se font suivant la norme CEI 60287.

D'une façon générale tous les équipements (tableaux électriques) soumis à des tensions ou traversés par des courants harmoniques, ont des pertes accentuées et devront faire l'objet de déclassements éventuels. Par exemple, une cellule départ condensateur est dimensionnée pour un courant égal à 1,3 fois le courant réactif de compensation. Ce surdimensionnement ne tient toutefois pas compte de l'augmentation de l'échauffement due à l'effet de peau dans les conducteurs.

Le relevé des taux de courants ou de tensions harmoniques, se fait avec un analyseur de spectre qui donne l'amplitude de chaque composante.

Il est important de choisir des capteurs (de courant ou de tension) ayant une bande passante suffisante pour la bande de fréquences mesurée.

La valeur efficace du courant déformé (ou de la tension déformée) peut :

- soit être mesurée avec un appareil à vraie valeur efficace,
- soit être reconstituée à partir du spectre issu d'un analyseur,
- soit être estimée à partir d'un relevé oscilloscopique.

3 Limites acceptables, recommandations, normes

3.1 Valeurs données à titre indicatif

- machines synchrones : distorsion en courant statorique admissible = 1,3 à 1,4 % ;
- machines asynchrones : distorsion en courant statorique admissible = 1,5 à 3,5 % ;
- câbles : distorsion admissible en tension âme-écran = 10 % ;
- condensateurs de puissance : distorsion en courant = 83 % ce qui donne une surcharge de 30 % (1,3 I nominale) la surcharge en tension pouvant atteindre 10 % ;
- électronique sensible : distorsion en tension 5 %, taux individuel 3 % suivant le matériel.

3.2 Limites normalisées

La série des normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) définissent certaines limites concernant les harmoniques, notamment :

- CEI 61000-3-2 qui définit des limites d'émission de courant harmonique par les appareils consommant moins de 16 A par phase (sauf certaines catégories d'appareils - voir la norme). Le cas des appareils consommant au-delà de 16 A est examiné dans le rapport technique CEI 61000-3-4 et devrait être précisé par une norme CEI 61000-3-12 en préparation.
- CEI 61000-2-2 qui définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension (cf. **fig.4**).

- CEI 61000-2-4 qui définit les niveaux de compatibilité dans les réseaux d'installations industrielles.

Rappelons qu'un niveau de compatibilité n'est pas une limite absolue ; il peut être dépassé avec une faible probabilité.

D'autre part, la norme EN 50160 concerne les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution.

En France, EDF propose un contrat dit « Emeraude » aux abonnés tarif vert par lequel il y a un engagement réciproque : de qualité, pour EDF, et de limitation de pollution de la part de l'abonné.

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %	Rang harmonique n	Tension harmonique %
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	$0,2+0,5 \times 25/n$				

Fig. 4 : niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux publics basse tension (CEI 61000-2-2).

4 Les générateurs de grandeurs électriques harmoniques ou pollueurs

Dans le domaine industriel, ce sont :

- les convertisseurs statiques,
- les fours à arc,
- l'éclairage,

- les inductances saturées,
- autres, telles que les dentures des machines tournantes, harmoniques souvent négligeables.

4.1 Les convertisseurs statiques sur réseau triphasé

Les ponts redresseurs et en général les convertisseurs statiques (diodes et thyristors) sont générateurs de courants harmoniques. Ainsi, avec le pont de Graetz, le courant continu parfait débité, impose un courant alternatif non

sinusoïdal, composé de crêteaux lorsque la charge est fortement inductive (cf. **fig. 5**), ou de pointes lorsque le pont de diodes est suivi d'un condensateur comme c'est souvent le cas (cf. **fig. 6**).

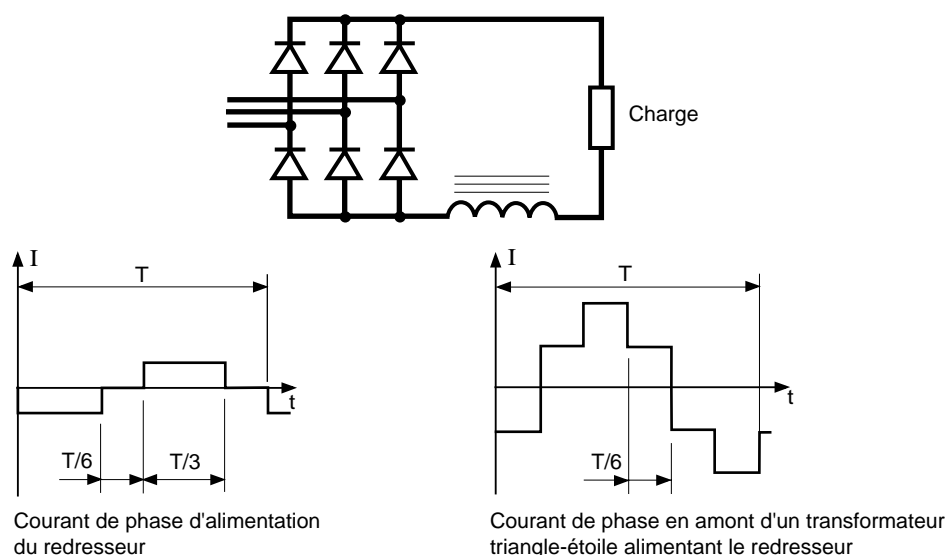


Fig. 5 : courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz débitant un courant continu parfait sur charge très inductive.

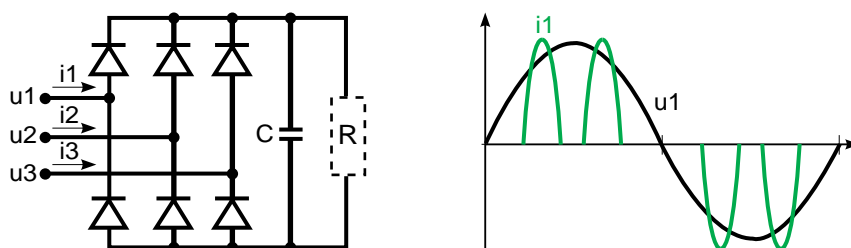


Fig. 6 : courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz suivi d'un condensateur.

Malgré leur forme différente, les deux courants ont les mêmes composantes harmoniques caractéristiques.

Les composantes harmoniques caractéristiques des créneaux de courants d'alimentation des redresseurs ont les rangs n , tels que $n = (k p) \pm 1$, où :

■ $k = 1, 2, 3, 4, 5, \dots$

■ $p =$ nombre de bras du redresseur, par exemple :

□ pont de Graetz $p = 6$,

□ hexaphasé $p = 6$,

□ dodécaphasé $p = 12$.

Ainsi, pour les redresseurs cités, les harmoniques présents seront de rangs 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, etc. avec $p = 6$, et de rangs 11, 13, 23, 25, etc., avec $p = 12$.

Ces harmoniques, dits caractéristiques, sont de rangs impairs, et leurs intensités, lorsqu'elles sont proches de la forme idéale de la figure 5 ont, en première approximation, pour valeur $I_n = I_1/n$, avec I_1 courant à la fréquence fondamentale.

Il est alors aisé de constater que les harmoniques I_5 et I_7 ont les amplitudes les plus grandes, et qu'ils peuvent être supprimés par l'utilisation du pont dodécaphasé ($p = 12$).

Dans la pratique, les spectres de courant sont sensiblement différents. En effet de nouvelles composantes harmoniques paires et impaires dites non caractéristiques et de faibles amplitudes sont créées, et les amplitudes des harmoniques caractéristiques modifiées, par plusieurs facteurs tels que :

■ dissymétrie de construction,

■ imprécision de l'instant d'ouverture des thyristors,

■ temps de commutation,

■ filtrage imparfait.

De plus, dans le cas de ponts à thyristors un déphasage des harmoniques en fonction de l'angle de retard de l'amorçage peut être observé.

Les ponts mixtes diodes-thyristors sont générateurs d'harmoniques d'ordre pair. Leur emploi est limité aux petites puissances car l'harmonique de rang 2 est très gênant et difficile à éliminer.

Les autres convertisseurs de puissance tels que les gradateurs, les cycloconvertisseurs, etc., ont des spectres variables et plus riches que les redresseurs. A noter qu'ils sont parfois remplacés par des redresseurs à technique MLI - Modulation de Largeur d'Impulsions - (en anglais PWM - Pulse Width Modulation) qui travaillant avec une fréquence de découpage aux alentours de 20 kHz, sont normalement conçus pour ne générer qu'un faible niveau d'harmoniques.

Les courants harmoniques de plusieurs convertisseurs se combinent vectoriellement, au niveau du jeu de barres commun d'alimentation. Leurs phases ne sont généralement pas connues sauf dans le cas des redresseurs à diodes. Ce qui permet, avec deux ponts hexaphasés à diodes ayant des charges égales, d'atténuer les courants harmoniques de rang 5 et 7, si les deux transformateurs d'alimentation ont des couplages judicieusement choisis (cf. **fig. 7**).

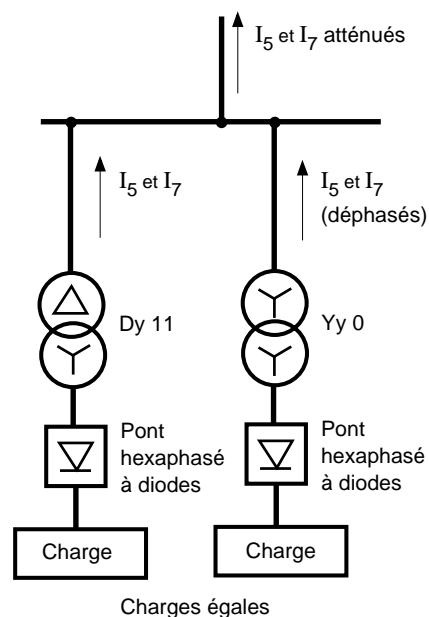


Fig. 7 : montages atténuant I_5 et I_7 .

4.2 L'éclairage

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes, d'où une

attention particulière à porter à la détermination de la section et de la protection du conducteur neutre qui, véhiculant la somme des courants d'harmoniques 3 des trois phases, risque un échauffement important.

4.3 Les fours à arc

Les fours à arc utilisés en sidérurgie peuvent être à courant alternatif ou à courant continu.

Cas du four à arc à courant alternatif (cf. fig. 8)

L'arc est non linéaire, dissymétrique et instable. Il va induire des spectres possédant des raies impaires, paires et un spectre continu (bruit de fond à toutes les fréquences).

Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée : fusion, affinage... Aussi seules des mesures peuvent déterminer le spectre de façon précise (exemple : cf. fig. 9).

Cas du four à arc à courant continu (cf. fig. 10)

L'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur.

L'arc est plus stable qu'en courant alternatif.

Le courant absorbé se décompose en :

- un spectre semblable à celui d'un redresseur,
- un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

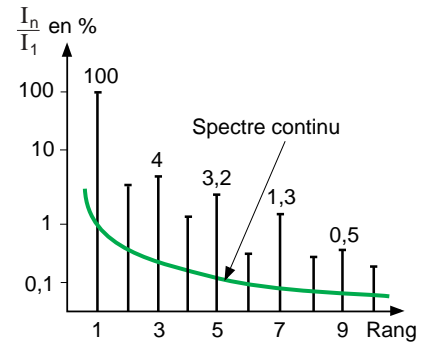


Fig. 9 : spectre du courant alimentant un four à courant alternatif.

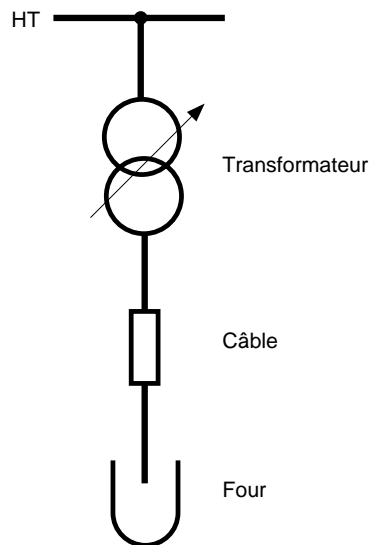


Fig. 8 : cas du four à arc alimenté en courant alternatif.

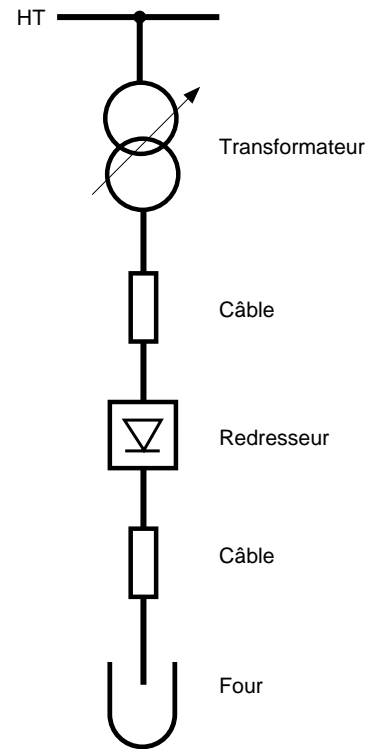


Fig. 10 : cas du four à arc alimenté en courant continu.

4.4 Les inductances saturées

De telles inductances ont leur impédance fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables

de ce courant. C'est le cas, dans une certaine mesure, des transformateurs à vide soumis à une surtension permanente.

4.5 Les machines tournantes

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables. Les petites machines synchrones sont toutefois, génératrices de tensions harmoniques de rang 3 qui peuvent avoir une incidence sur :

- l'échauffement permanent (hors défaut) des résistances de mise à la terre du neutre des alternateurs ;
- le fonctionnement des relais ampère-métriques de protection contre les défauts d'isolement.

4.6 Modèle utilisé dans les calculs

Dans l'exécution des calculs les pollueurs, convertisseurs statiques et fours à arc, sont considérés comme des « générateurs de courant » harmonique (cf. **fig. 11**). Dans une large mesure, les courants harmoniques absorbés par les pollueurs sont indépendants des autres charges et de l'ensemble des impédances de réseau. Ces courants peuvent être également considérés comme injectés : il suffit d'en changer arbitrairement le signe.

L'approximation est plus grossière pour les fours à arc. Dans ce cas la modélisation par la source de courant doit être corrigée par une impédance parallèle judicieusement choisie.

La prise en compte d'harmoniques de tension préexistants au point de raccordement avec le réseau amont est également possible en utilisant le modèle équivalent de Norton (cf. **fig. 12**). Pour chaque rang de U_H on calcule I_H en tenant compte de Z et de l'impédance aval du réseau.

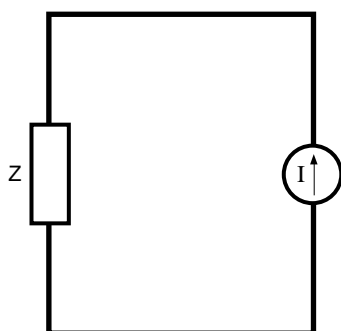


Fig. 11 : la source de courant est le modèle appliqué aux générateurs de courants harmoniques.

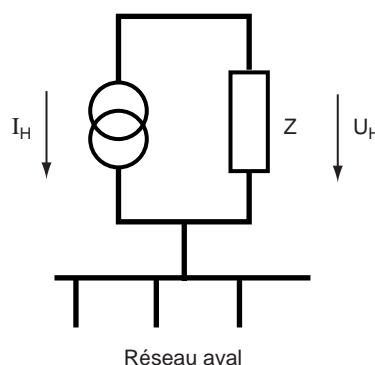


Fig. 12 : modèle équivalent de Norton.

4.7 Réalisation des calculs

Lorsqu'ils sont connus, les arguments (déphasages) des courants harmoniques peuvent être pris en compte par un calcul vectoriel. Pour certains pollueurs (monophasés) il est intéressant de réaliser une modélisation tenant compte du déséquilibre entre les phases.

Lorsque les courants harmoniques générés par les pollueurs ne sont connus qu'en amplitude, le rapport technique CEI 61000-3-6 propose une démarche permettant de superposer les effets de plusieurs pollueurs.

5 Réseau avec pollueur et condensateurs, problème d'amplification par résonance

Dans un réseau pollué, deux cas sont à envisager :

- le réseau ne possède pas de condensateurs de puissance ;
- le réseau possède de tels condensateurs.

5.1 En l'absence de batterie de condensateurs, la pollution harmonique est limitée et proportionnelle aux courants des pollueurs

En principe, dans le domaine harmonique, le réseau reste inductif.

Sa réactance est proportionnelle à la fréquence ; dans une première approche l'effet des charges et des résistances est négligeable. L'impédance du réseau vue d'un nœud du réseau, se limite donc à la réactance de court-circuit X_{cc} au nœud considéré.

Les niveaux de tensions harmoniques peuvent être estimés à partir de la puissance du pollueur et de la puissance de court-circuit au nœud (jeu de barres) de raccordement du pollueur, la réactance de court-circuit étant considérée proportionnelle à la fréquence (cf. **fig. 13**).

Dans le schéma de la figure 13 :

L_{cc} = inductance de court circuit du réseau, vue du jeu de barres sur lequel sont raccordés les (ou le) pollueurs, I_n = courants des pollueurs, d'où :

$$X_{cc_n} = L_{cc} \omega_n = L_{cc} n(2\pi f_1)$$

$$\text{donc } V_n = X_{cc_n} I_n = L_{cc} n(2\pi f_1) I_n$$

La pollution harmonique reste acceptable si le pollueur ne dépasse pas une certaine puissance. Cependant, il faut être prudent car des résonances (voir § suivant) peuvent exister, à partir d'un réseau voisin possédant des condensateurs et couplé par un transformateur.

Note : En réalité l'inductance harmonique du réseau X , sans condensateurs (essentiellement distributeur), représentée par L_{cc} , n'est

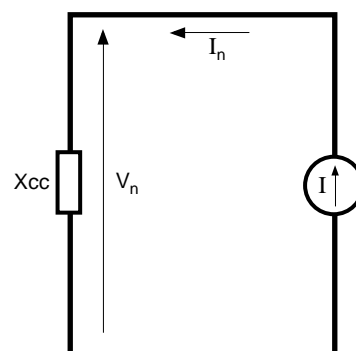


Fig. 13 : la tension harmonique V_n est proportionnelle au courant I_n injecté par le pollueur.

proportionnelle à la fréquence que dans une large approximation ; aussi, habituellement dans les calculs, l'impédance de court-circuit du réseau est majorée d'un facteur 2 ou 3, notamment si on a un fort doute sur les caractéristiques du réseau.

Ainsi : $X_n = k.n.X_1$ avec $k = 2$ ou 3 .

En effet, les constituants de l'impédance harmonique d'un réseau sont d'espèces différentes : impédance de court-circuit du distributeur, câbles, lignes, transformateurs, condensateurs lointains, machines, autres charges (éclairage, chauffage...).

5.2 Les courants harmoniques générés par des dispositifs pollueurs peuvent être dangereusement amplifiés par la présence d'une batterie de condensateurs

A certaines fréquences il y a résonance entre la batterie de condensateurs et la réactance du réseau vue des bornes de la batterie. Il en résulte une amplification plus ou moins amortie des grandeurs harmoniques (courants et tensions), si le rang de la résonance est le même que celui d'un des courants injectés par le pollueur. Cette pollution peut être dangereuse pour les équipements.

Il y a donc un problème, étudié dans le paragraphe suivant. Cette résonance est dite parallèle.

Que sont ces résonances parallèles et pourquoi peuvent-elles provoquer une pollution harmonique dangereuse ?

Dans le domaine des fréquences harmoniques, le réseau peut se ramener en première approximation au schéma de la **figure 14**.

Dans ce schéma :

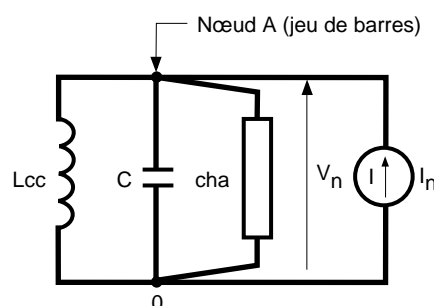
- L_{cc} = inductance de court-circuit du réseau amont, vue du jeu de barres sur lequel sont raccordés la batterie de condensateurs et le pollueur,
- C = condensateurs,
- I_n = courants du pollueur,
- cha = charges linéaires (effet JOULE, transmission d'énergie mécanique).

En principe, on considère la réactance harmonique de court-circuit vue du jeu de barres, point de raccordement (A) des condensateurs, des charges et du pollueur d'où $V_n = Z_{AO} I_n$.

Les courbes des impédances en fonction des fréquences (cf. **fig. 15**) montrent que :

- pour la fréquence de résonance f_{ar} , il y a exactement compensation de l'effet inductif par l'effet capacitif ;
- la réactance du circuit bouchon :
- est inductive pour les basses fréquences, dont la fréquence fondamentale,

a : représentation électrique harmonique d'une phase



b : représentation unifilaire

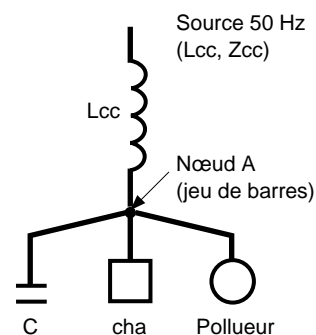


Fig. 14 : schémas équivalents d'un circuit soumis à des courants harmoniques et comportant une batterie de condensateur.

- augmente avec la fréquence pour devenir très grande, et brusquement capacitive à la fréquence f_{ar} de la résonance ;
- le maximum obtenu de la valeur de l'impédance est voisin de $R = U^2/P$, où P représente la somme des puissances actives des moteurs en charge, autres que ceux alimentés par un convertisseur statique.

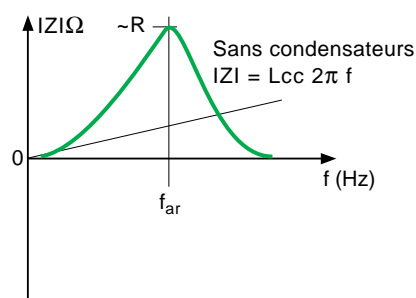
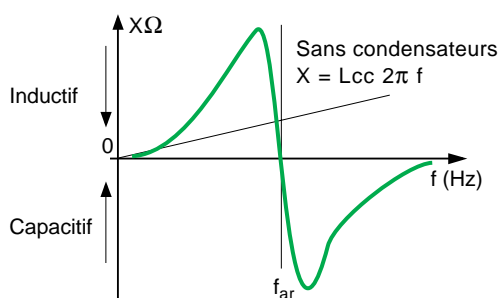


Fig. 15 : évolutions de la réactance et du module de l'impédance du schéma équivalent

Si un courant harmonique I_n d'ordre n , correspondant à la fréquence de résonance parallèle f_{ar} , est injecté par le pollueur, la tension harmonique correspondante peut être estimée par : $V_n = R I_n$ avec $n = n_{ar} = f_{ar}/f_1$.

Estimation de n_{ar}

Le rang n_{ar} de la résonance parallèle est le rapport de la fréquence de résonance f_{ar} à la fréquence fondamentale f_1 (fréquence industrielle).

Soit, le réseau industriel le plus élémentaire, sous la forme du schéma équivalent de la **figure 16** représentant une batterie de condensateurs C alimentée par un transformateur d'inductance de court-circuit L_T , avec L_{cc} représentant l'inductance de court-circuit du réseau de distribution vue des bornes amont du transformateur,

$$f_{ar} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_{cc} + L_T) C}}$$

Comme $L_{cc} \ll L_T$, le rang de la résonance parallèle est très sensiblement le même que l'impédance du réseau soit vue du point A ou du point B ; ce dernier pouvant être par exemple les bornes de livraison.

D'une manière générale, on obtient :

$$n_{ar} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}} \text{ dans laquelle :}$$

S_{cc} = puissance de court-circuit aux bornes de la batterie de condensateurs,

Q = puissance de cette batterie sous la tension appliquée.

Généralement, S est exprimé en MVA, et Q en Mvar.

Conséquences pratiques :

■ Si le rang d'un courant harmonique injecté par un pollueur correspond ou est proche du rang de

la résonance parallèle il y a risque de surtensions harmoniques, particulièrement lorsque le réseau est peu chargé. Les courants harmoniques sont alors intenses dans les constituants du réseau, et présentent un danger certain pour les condensateurs.

■ Si le rang de la résonance parallèle correspond à la fréquence des équipements de télécommande du distributeur il y a risque de perturbation de ces équipements.

Pour éviter qu'une résonance soit dangereuse, il faut la placer en dehors du spectre injecté, et/ou l'amortir.

L'impédance de court-circuit d'un réseau est souvent mal connue, et de plus varie dans de grandes proportions, d'où de larges variations de la fréquence de la résonance parallèle.

Il importe donc de stabiliser cette fréquence à une valeur ne correspondant pas à celles des courants harmoniques injectés. Ceci est obtenu en montant une inductance en série avec la batterie de condensateurs. Le circuit ainsi créé est alors représenté par le schéma de la **figure 17** où $V_n = Z_{AO} I_n$.

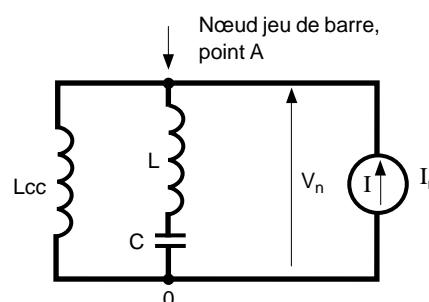


Fig. 17 : self, placée en série avec le condensateur.

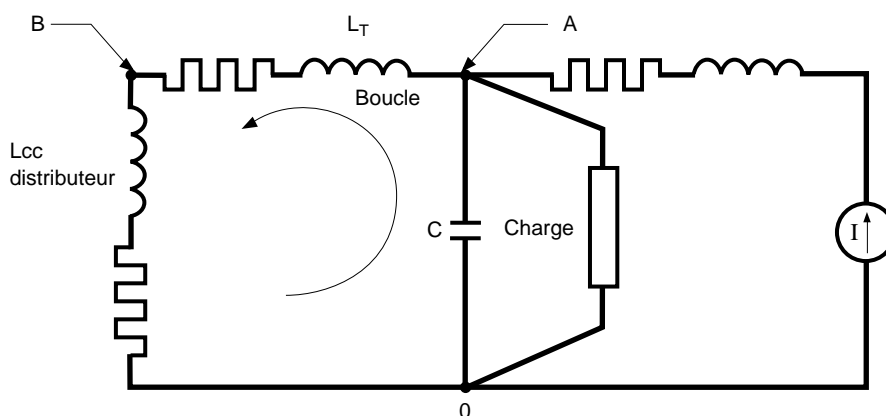


Fig. 16 : le condensateur constitue, avec la somme des impédances en amont, un circuit résonant.

Une résonance série, entre L et C, apparaît. Par opposition à cette résonance qui donne une impédance minimale, la résonance parallèle est très souvent appelée antirésonance.

La formule donnant la position de l'antirésonance

$$\text{est : } f_{ar} = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_{cc} + L) C}}$$

L_{cc} étant généralement petite devant L, la formule montre que la présence de l'inductance L, placée en série avec les condensateurs, rend la fréquence f_{ar} moins sensible aux variations de l'inductance de court-circuit L_{cc} (vue des points de raccordement = jeu de barres A).

La résonance série

La branche constituée par l'inductance L et le condensateur C (cf. **fig. 18**), forme un système résonant série d'impédance :

$Z = r + j (L\omega - 1/C\omega)$, présentant :

- une valeur minimale résistive r (résistance de la bobine d'inductance) pour la fréquence de résonance f_r ,

- une réactance capacitive au dessous de la fréquence f_r ,

- une réactance inductive au dessus de la fréquence f_r , avec

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L C}}$$

Les courbes de la **figure 19** donnent l'allure de l'impédance du réseau comprenant l'impédance de court-circuit et celle de la branche L-C, vue du jeu de barres A.

Le choix de f_{ar} dépend de L_{cc} , de L, et de C, alors que celui de f_r ne dépend que de L et de C ; f_{ar} et f_r sont donc d'autant plus proches que L_{cc} est petite devant L. La compensation de l'énergie réactive, et la tension appliquée aux condensateurs sont fonction entre autres de L et de C.

L'adjonction de l'inductance L se fait de deux manières différentes selon la position de la résonance série par rapport au spectre, d'où les deux variantes :

- inductance antiharmonique (résonance série en dehors des raies du spectre) ;
- filtre (résonance série sur une raie du spectre).

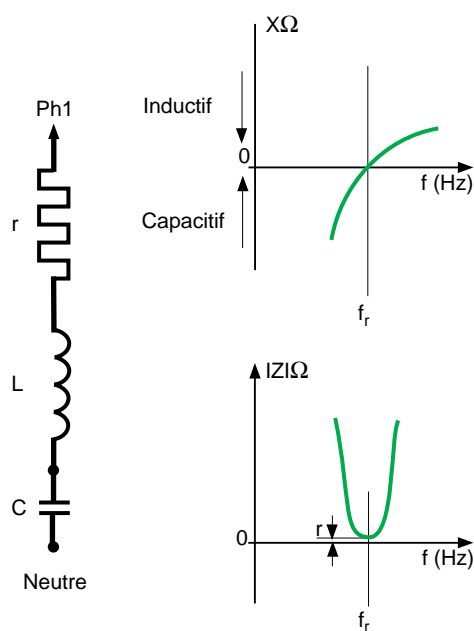


Fig. 18 : impédance du circuit bouchon.

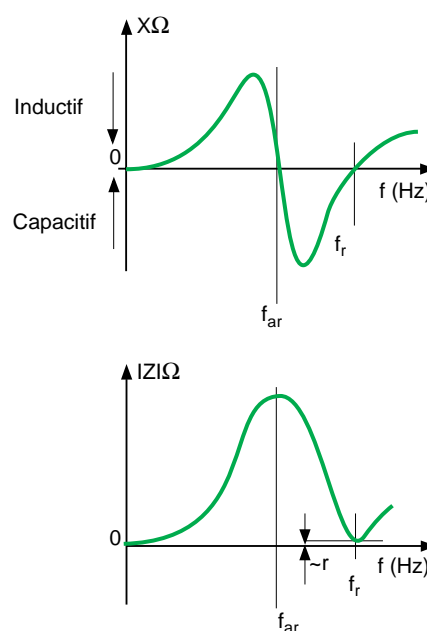


Fig. 19 : impédance du réseau au point A.

6 L'inductance antiharmonique

Elle permet de protéger une batterie de condensateurs contre les surcharges harmoniques.

Le schéma de référence est toujours celui de la figure 17.

Dans ce montage, le choix de L est tel que la branche L-C (L inductance antiharmonique, et C condensateurs de compensation du réactif) est inductive dans le domaine des fréquences harmoniques, domaine du spectre.

Ainsi par principe, la fréquence de résonance f_r de cette branche se situera au dessous du spectre du pollueur.

La branche L-C et le réseau (Lcc), sont alors tous deux inductifs dans le domaine du spectre, et les courants harmoniques injectés par le pollueur se partagent en proportion inverse des impédances. Il y a donc peu de courants harmoniques dans la branche L-C, ce qui protège les condensateurs, et la majeure partie des courants harmoniques circule dans le restant du réseau, surtout dans l'impédance de court-circuit.

L'impédance du réseau vue du jeu de barres de raccordement de la branche L-C, a alors pour allure la courbe de la **figure 20**.

Il n'y a plus d'antirésonance dans le domaine du spectre de courants, aussi l'emploi d'une inductance antiharmonique présente deux avantages :

- elle supprime les risques de forts courants harmoniques dans les condensateurs ;
- elle supprime corrélativement les fortes distorsions de la tension du réseau, sans toutefois ramener les taux à une faible valeur spécifiée.

Cependant des précautions s'imposent :

■ Il ne doit pas y avoir d'autres batteries de condensateurs pouvant donner par une antirésonance, un caractère capacitif au réseau initial dans le domaine du spectre.

■ Il faut veiller à ne pas placer l'antirésonance sur une fréquence de télécommande du distributeur, car cela provoquerait une charge accrue des générateurs Haute Fréquence (175 Hz, 188 Hz). Or les fréquences d'accord f_r des inductances anti-harmoniques sont généralement comprises entre 135 et 225 Hz pour un réseau 50 Hz.

■ A cause du spectre continu, l'inductance antiharmonique ne s'applique au four à arc qu'avec certaines précautions (études particulières).

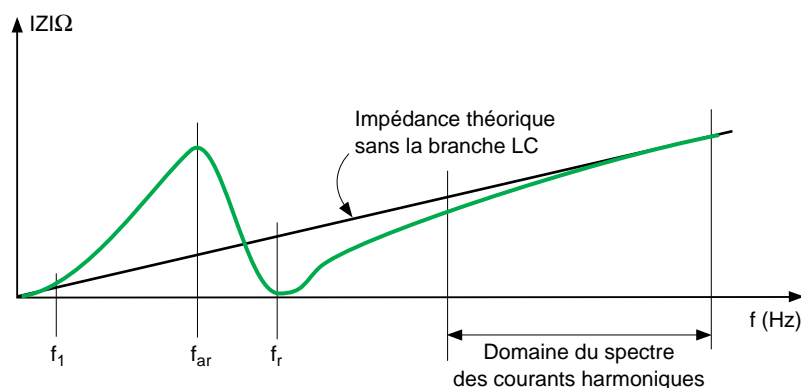


Fig. 20 : avec f_r bien en dessous du spectre harmonique, les condensateurs sont protégés.

7 Les filtres

La limitation à une faible valeur spécifiée des tensions harmoniques du réseau est spécifique de l'emploi des filtres.

Il existe trois classes de filtres permettant de réduire les tensions harmoniques :

- le shunt résonant,
- les filtres amortis,
- les filtres actifs.

7.1 Le shunt résonant

Le filtre shunt résonant (cf. fig. 18) est constitué par la branche L-C dont la fréquence d'accord

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L C}}$$

est placée sur la fréquence de la tension harmonique que l'on veut éliminer.

Cette finalité diffère fondamentalement de celle de l'inductance antiharmonique.

Le shunt résonant présente, à f_r , une impédance minimale réduite à la résistance r de l'inductance. Il dérive donc en lui-même la presque totalité des courants harmoniques injectés de fréquence f_r , avec un taux de tension harmonique de fréquence f_r faible, car proportionnel au produit de la résistance r par le courant traversant le filtre.

En principe, il y a autant de shunts résonants que d'harmoniques à traiter, à raccorder au jeu de barres où la réduction des tensions harmoniques est spécifiée. Leur ensemble constitue une batterie.

La **figure 21** représente l'impédance harmonique d'un réseau équipé d'une batterie de quatre filtres de rang 5, 7, 11 et 13. Elle montre qu'il y a autant d'antirésonances que de

filtres. Ces antirésonances doivent se situer entre les raies du spectre. Ce qui impose, si une segmentation de la batterie est jugée nécessaire, une étude soignée.

Principales caractéristiques d'un shunt résonant

Elles sont fonction de $n_r = f_r/f_1$ rang d'accord du filtre, avec :

- f_r = fréquence d'accord,
- f_1 = fréquence du fondamental (ou industrielle, 50 Hz par exemple).

Ces caractéristiques sont :

- La puissance réactive de compensation Q_{var}
Le shunt résonant, capacitif au-dessous de son accord, réalise la compensation d'énergie réactive à la fréquence industrielle.

La puissance réactive de compensation du shunt sous la tension de service U_1 au jeu de barres de raccordement, est donnée par la formule :

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} U_1^2 C 2\pi f_1$$

(rappel : l'indice 1 est relatif au fondamental) ;
 C étant la capacité phase-neutre d'une des trois branches de la batterie vue en étoile.

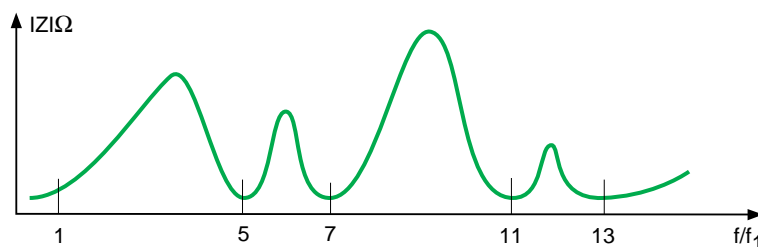


Fig. 21 : impédance d'un réseau équipé de filtres shunt.

A première vue, il semble paradoxal que la présence de l'inductance augmente l'énergie réactive fournie, cependant, cela s'explique par l'augmentation de tension à fréquence industrielle f_1 provoquée par l'inductance sur les bornes des condensateurs.

■ L'impédance caractéristique $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$

■ Le facteur de qualité $q = X_0/r$

Un filtre efficace doit avoir une inductance possédant un grand facteur q , donc $r \ll X_0$ à la fréquence f_r .

Ordres de grandeur de q :

- 75 pour les inductances dans l'air,
- supérieur à 75 pour les inductances à fer.

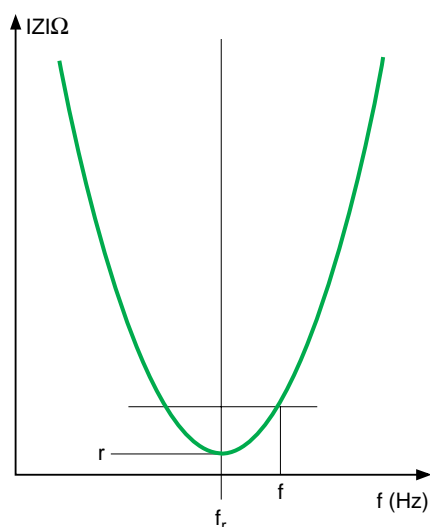


Fig. 22 : courbe $Z = f(f)$ d'un shunt résonant.

■ La bande passante (cf. fig. 22) en valeur

$$\text{relative BP} = \frac{1}{q} = 2 \frac{f - f_r}{f_r} = \frac{r}{X_0}$$

■ La résistance de l'inductance $r = X_0/q$

Elle est définie à la fréquence f_r .

Elle est fonction de l'effet de peau. C'est aussi l'impédance à l'accord du shunt résonant.

■ Les pertes dues au courant capacitif à

$$\text{fréquence fondamentale } p_1 = \frac{Q_{\text{var}}}{q n_r}$$

avec :

□ Q_{var} = puissance de compensation réactive du filtre,

□ p_1 = pertes du filtre à fréquence industrielle en W.

■ Les pertes dues aux courants harmoniques ne peuvent pas s'exprimer par de simples formules ; elles sont supérieures à l'expression

$$p_n = \frac{U_{nr}^2}{r}$$

dans laquelle U_{nr} est la tension composée harmonique de rang n_r sur le jeu de barres après filtrage.

Dans la pratique, les performances du shunt résonant sont limitées par des causes de désaccord du filtre et des solutions spécifiques sont donc à prévoir :

■ pour pallier de façon satisfaisante les inconvénients des tolérances de fabrication, des prises de réglage peuvent être placées sur l'inductance ;

■ la sensibilité au désaccord, pour accepter des variations de f_1 (fréquence du réseau), et de f_r (provoquées par des variations de la capacité des condensateurs en fonction de la température), peut être réduite par un juste compromis entre son facteur q et ses performances de filtrage.

7.2 Les filtres amortis

Le filtre amorti d'ordre deux

Sur four à arc, le shunt résonant doit être amorti.

En effet, le spectre continu du four à arc traduit une probabilité d'un courant injecté de fréquence égale à celle de l'antirésonance. Alors il ne faut plus se contenter de réduire les tensions harmoniques de rang caractéristique, mais également réduire les antirésonances, les amortir. D'autre part, le montage d'un nombre élevé de shunts résonants en batterie n'est pas économique, la solution est de faire appel à un

filtre de large spectre qui possède les propriétés suivantes :

■ amortir les antirésonances,

■ réduire les tensions harmoniques de fréquences égales ou supérieures à son accord, d'où le nom de « filtre amorti passe-haut »,

■ amortir rapidement le régime transitoire à la mise sous tension du filtre.

Le filtre amorti d'ordre deux est constitué d'un shunt résonant auquel est adjointe, aux bornes de l'inductance, une résistance d'amortissement R .

La **figure 23** représente une des trois phases du filtre.

Le filtre amorti d'ordre deux présente une réactance nulle pour la fréquence f_r plus grande que la fréquence f avec :

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L C}} \quad \text{et} \quad f_r = \frac{1 + Q q}{2\pi q \sqrt{(Q^2 - 1) L C}}.$$

où :

Q = facteur de qualité du filtre amorti,

q = facteur de qualité de l'inductance.

Sachant que le filtre est étudié pour que f_r coïncide avec la première raie caractéristique du spectre à filtrer, cette raie est généralement la plus importante.

Lorsque Q (ou R) tend vers de fortes valeurs, f_r tend vers f , ce qui revient à écrire que le shunt résonant est un cas limite du filtre amorti d'ordre deux.

Ne pas confondre Q facteur de qualité et Q_{var} puissance réactive de compensation du filtre.

Fonctionnement d'un filtre amorti d'ordre deux :

■ Au dessous de f_r

La résistance d'amortissement contribue à la réduction de l'impédance du réseau à l'antirésonance, donc réduit les tensions harmoniques éventuelles.

■ A f_r

La réduction de la valeur de la tension harmonique à une valeur spécifiée est possible car, à cette fréquence, il ne peut pas exister de résonance entre le réseau et le filtre, ce dernier présentant alors une impédance à caractère purement résistif.

Cependant, cette impédance étant plus élevée que la résistance r de l'inductance, il en résulte une performance de filtrage inférieure au shunt résonant.

■ Au dessus de f_r

Le filtre présente une réactance inductive de même nature que le réseau (inductif), ce qui lui permet une certaine absorption des raies de

spectre supérieures à f_r , et notamment un spectre continu. Cependant, la présence éventuelle d'anti-résonances dans l'impédance du réseau sans le filtre, dues à des batteries de condensateurs existantes, réduit les performances du filtrage.

Aussi, les batteries existantes doivent être prises en compte dans l'étude de réseau, et quelquefois, faire l'objet d'aménagements.

Les principales caractéristiques électriques du filtre amorti d'ordre deux sont fonction de $n_r = f_r/f_1$ rang d'accord du filtre, avec :

■ f_r = fréquence d'accord,

■ f_1 = fréquence du fondamental (ou industrielle, 50 Hz par exemple).

Ces caractéristiques sont :

■ La puissance réactive de compensation

Pour un filtre amorti d'ordre deux sous la tension de service U_1 (l'indice 1 est relatif au fondamental), elle est sensiblement celle du shunt résonant de même inductance et même capacité, soit en pratique :

$$Q_{var} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} U_1^2 C 2\pi f_1$$

C étant la capacité phase-neutre d'une des trois branches de la batterie vue en étoile.

■ L'impédance caractéristique $X_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$

■ Le facteur de qualité de l'inductance $q = X_0/r$ avec r résistance de l'inductance, fonction de l'effet de peau, définie à la fréquence f_r .

■ Le facteur de qualité du filtre $Q = R/X_0$

Les facteurs de qualité Q utilisés sont généralement compris entre 2 et 10.

■ Les pertes dues au courant fondamental de compensation et aux courants harmoniques Elles sont plus élevées que celles du shunt résonant et ne peuvent être déterminées que par l'étude de réseau.

Le filtre amorti est utilisé seul, ou bien en batterie de deux filtres, ou bien associé à un shunt résonant, dans ce cas le shunt résonant est placé sur la plus basse des raies du spectre.

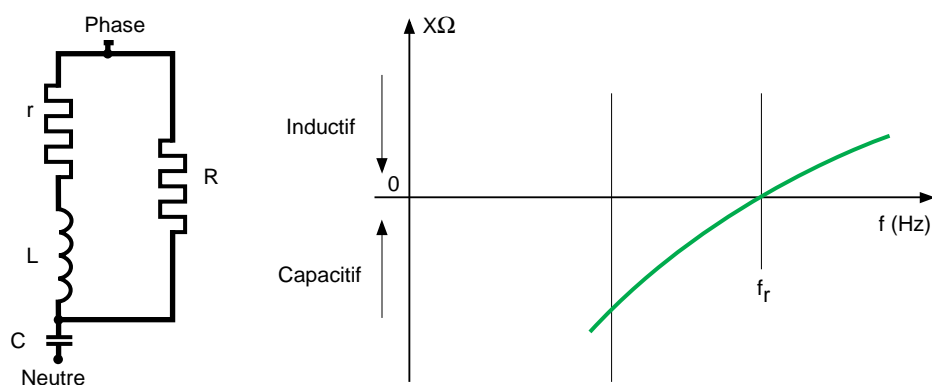


Fig. 23 : filtre amorti d'ordre 2.

La **figure 24** permet de comparer l'impédance d'un réseau selon qu'il comporte un filtre amorti d'ordre deux, ou un shunt résonant.

Evocation d'autres filtres amortis

Il existe d'autres filtres amortis plus rarement employés dérivés du filtre d'ordre deux.

■ Le filtre amorti d'ordre trois (cf. **fig. 25a**)

De conception plus complexe que le filtre d'ordre deux, le filtre d'ordre trois est spécifique des fortes puissances de compensation.

Le filtre d'ordre trois est obtenu à partir du filtre d'ordre deux par adjonction d'une batterie complémentaire C2 en série avec la résistance R, cette disposition permet la réduction des pertes dues au fondamental.

Le choix de C2 permet également d'améliorer le comportement du filtre au dessous de la fréquence d'accord, ce qui est favorable à la réduction de l'antirésonance.

Le filtre d'ordre trois devrait se trouver sur les premières fréquences du spectre.

Cependant, la complexité du filtre d'ordre trois et l'aspect économique qui en découle, rendent le filtre d'ordre deux souvent préférentiel dans le domaine industriel.

■ Le filtre amorti type C (cf. **fig. 25b**)

Dans ce filtre, la batterie auxiliaire C2 est en série avec l'inductance. Ce filtre a sensiblement les mêmes propriétés que le filtre d'ordre trois.

■ Le filtre double amorti (cf. **fig. 25c**)

Composé de deux shunts résonants reliés par une résistance R, ce filtre amortit surtout l'antirésonance située entre les deux accords.

■ Le shunt résonant à faible q

Ce filtre, se comportant comme un filtre amorti à large bande, est d'un usage spécifique : il ne pourrait convenir que pour de très petites unités ne devant pas assurer de compensation de réactif, car l'inductance ayant une très forte résistance (souvent du fait de l'adjonction d'une résistance série) entraîne des pertes prohibitives dans le domaine industriel.

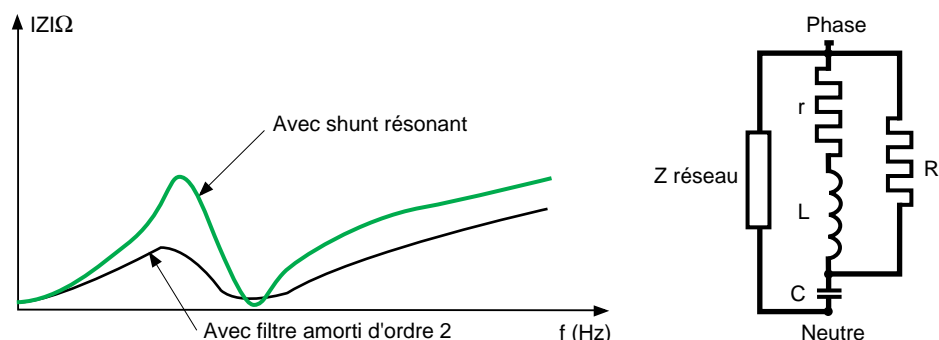


Fig. 24 : l'impédance, vue du point A, d'un réseau comportant soit un filtre d'ordre deux, soit un shunt résonant.

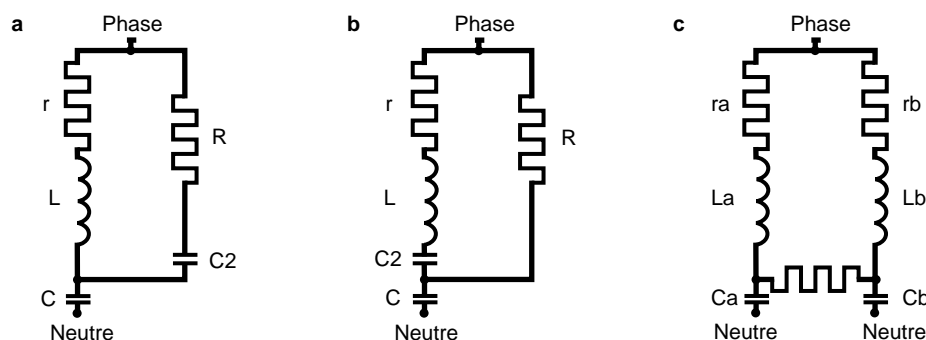


Fig. 25 : filtre amorti d'ordre 3 [a] ; filtre type C [b] ; filtre double, amorti [c].

7.3 Les filtres actifs

Le filtre actif permet de neutraliser l'effet d'une perturbation en injectant une grandeur égale à la perturbation mais de phase opposée.

Les filtres actifs sont souvent utilisés en complément des filtres passifs décrits dans ce

chapitre formant ainsi un filtrage hybride.

Ces dispositifs sont décrits dans le Cahier Technique n° 183 intitulé :

« Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs ».

8 Exemple d'étude d'un réseau simplifié

Le schéma de la **figure 26** modélise un réseau simplifié comportant un redresseur hexaphasé de 2000 kVA injectant un spectre de courants harmoniques et équipé successivement :

- d'une seule batterie de condensateurs de 1000 kvar ;
- d'un dispositif inductance antiharmonique et condensateurs d'une puissance de 1 000 kvar ;
- d'une batterie de deux filtres composée d'un shunt résonant accordé sur l'harmonique 5, et d'un filtre amorti d'ordre 2 accordé sur l'harmonique 7.

- la puissance de compensation de 1000 kvar est nécessaire pour ramener le facteur de puissance à une valeur conventionnelle ;
- les tensions harmoniques préexistantes du réseau distributeur 20 kV ont été négligées, par soucis de simplification.

Par cet exemple il est possible de comparer les performances des trois solutions, mais il convient évidemment de ne pas généraliser les résultats numériques.

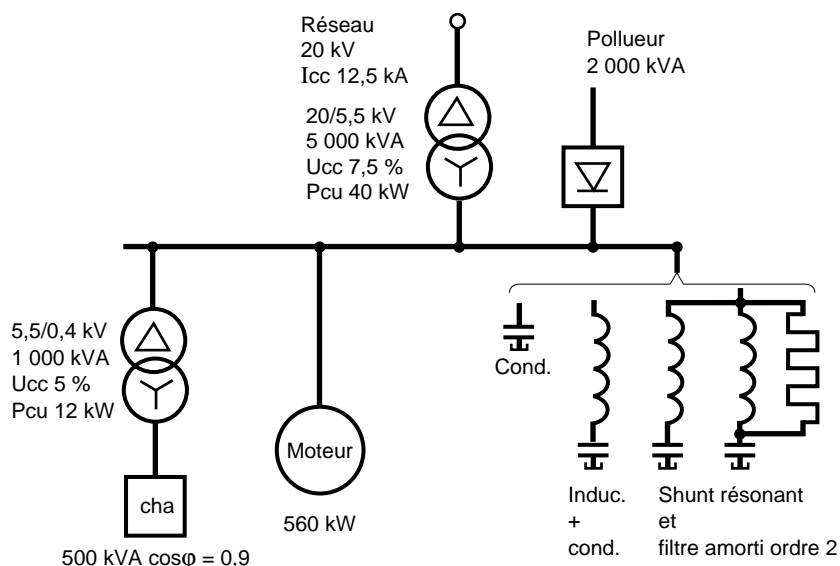


Fig. 26 : installation avec pollueur, condensateurs et filtres.

8.1 Montage de la batterie de condensateurs

La courbe impédance harmonique (cf. **fig. 27**) du réseau, vue du nœud d'injection des courants harmoniques, présente un maximum (anti-résonance) au voisinage du rang 7 du spectre des courants injectés. Il en résulte un taux individuel inacceptable de 11 % de la tension harmonique de rang 7 (cf. **fig. 28**).

Sont également inacceptables :

- la distorsion de tension du réseau 5,5 kV : 12,8 %, alors que le maximum admissible sans spécification particulière est de 5 % ;
 - la charge en courant efficace global des condensateurs : 1,34 du courant nominal, dépasse le maximum admissible qui est de 1,3 (cf. **fig. 29**).
- La solution condensateurs seuls est donc inacceptable.

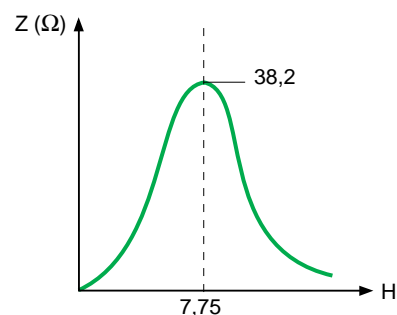


Fig. 27 : courbe de l'impédance harmonique vue du nœud d'injection des courants harmoniques dans un réseau équipé d'une seule batterie de condensateurs.

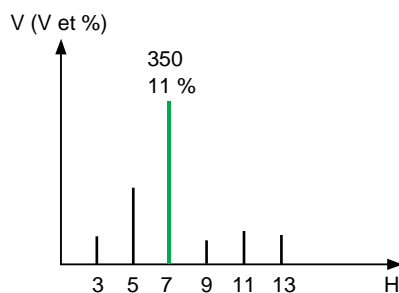


Fig. 28 : spectre des tensions harmoniques du réseau 5,5 kV équipé d'une seule batterie de condensateurs.

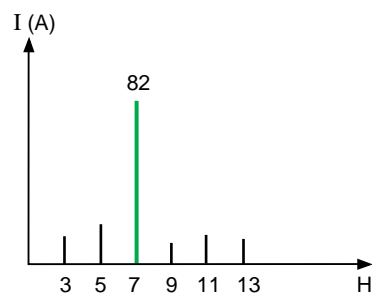


Fig. 29 : spectre des courants harmoniques traversant les condensateurs, dans un réseau équipé d'une seule batterie de condensateurs.

8.2 Montage d'un dispositif inductance antiharmonique et condensateurs

L'accord du dispositif est placé arbitrairement à $4,8 f_1$.

Impédance harmonique (cf. fig. 30)

La courbe impédance harmonique du réseau, vue du nœud d'injection des courants harmoniques, présente un maximum de 16Ω (antirésonance) au voisinage du rang 4,25. La faible impédance, de caractère inductif, au rang 5 sera favorable au filtrage des grandeurs harmoniques de ce rang.

Déformation des tensions (cf. fig. 31)

Sur le réseau 5,5 kV, les taux individuels de tensions harmoniques de 1,58 % (rang 7), de 1,5 % (rang 11), et de 1,4 % (rang 13) peuvent être trop élevés pour certains consommateurs sensibles. Mais dans bien des cas la distorsion de tension de 2,63 % est acceptable.

Au niveau 20 kV cette distorsion n'est plus que de 0,35 %, acceptable par le distributeur.

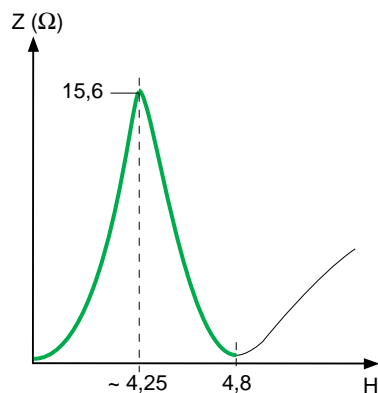


Fig. 30 : courbe de l'impédance harmonique vue du nœud d'injection des courants harmoniques dans un réseau équipé d'un dispositif à inductance antiharmonique.

Charge en courant des condensateurs (cf. fig. 32)

La charge en courant efficace global des condensateurs, comprenant les courants harmoniques, est de 1,06 fois le courant nominal, inférieur au maximum de 1,3. C'est vraiment l'apport positif de l'emploi d'une inductance antiharmonique par rapport à l'utilisation de simples condensateurs, vue précédemment.

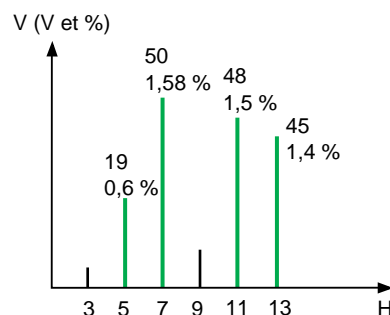


Fig. 31 : spectre des tensions harmoniques du réseau 5,5 kV équipé d'un dispositif à inductance antiharmonique. L'amplitude des harmoniques est ici exprimé en volts ou en pour cent de la tension simple ($55 \text{ kV}/\sqrt{3}$).

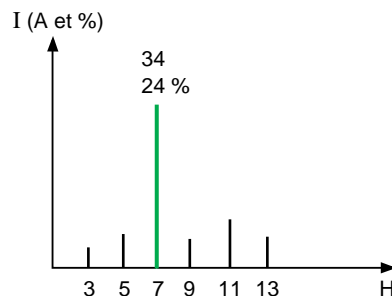


Fig. 32 : spectre des courants harmoniques traversant les condensateurs, dans un réseau équipé d'un dispositif à inductance antiharmonique.

8.3 Montage d'un filtre shunt résonant sur le rang 5 et d'un filtre amorti sur le rang 7

Dans cet exemple, la répartition des puissances réactives entre les deux filtres est telle que les tensions harmoniques filtrées de rang 5 et 7 aient sensiblement la même valeur. Ce qui, dans la réalité, n'est pas une obligation.

Impédance harmonique (cf. fig. 33)

La courbe impédance harmonique du réseau, vue du nœud d'injection des courants harmoniques, présente un maximum de $9,5 \Omega$ (antirésonance) au voisinage du rang 4,7.

Au rang 5, cette impédance se réduit à la résistance de l'inductance, elle est alors favorable au filtrage des grandeurs harmoniques de ce rang.

Au rang 7, la faible impédance purement résistive du filtre amorti est également favorable à la réduction de la tension harmonique de ce rang.

Et pour les rangs supérieurs à son accord, la courbe d'impédance du filtre amorti est favorable à la réduction des tensions harmoniques correspondantes.

Cette courbe représente donc un progrès par rapport au dispositif inductance antiharmonique et condensateurs, étudié précédemment.

Déformation des tensions (cf. fig. 34)

Sur le réseau 5,5 kV, les taux individuels de tensions harmoniques de rangs 5, 7, 11, 13 sont respectivement de 0,96 %, 0,91 %, 1,05 %, 1 % ce qui est admissible par la plupart des récepteurs sensibles. La distorsion de tension est alors de 1,96 %.

Au niveau 20 kV cette distorsion n'est plus que de 0,26 %, acceptable par le distributeur.

Charge en courant des condensateurs

Les condensateurs doivent être spécialement dimensionnés en prenant en compte la surtension à la fréquence fondamentale, les tensions et les courants harmoniques.

Cet exemple montre comment peut se faire une première approche de solution ; mais dans la réalité, outre le calcul des éléments (L-r-C-R), avant toute réalisation d'autres calculs s'avèrent indispensables :

- spectres de courants traversant les inductances associées aux condensateurs,
- globalisation des tensions aux bornes des condensateurs,
- tolérances de fabrication et prises de réglage des inductances si celles-ci sont nécessaires,

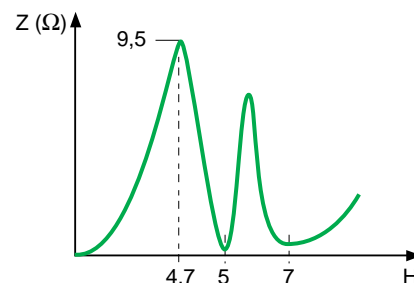


Fig. 33 : courbe de l'impédance harmonique vue du nœud d'injection des courants harmoniques dans un réseau équipé d'un filtre shunt résonant sur le rang 5 et d'un filtre amorti sur le rang 7.

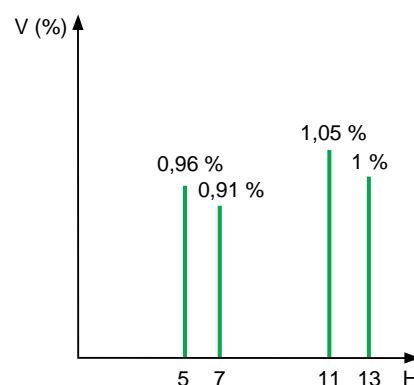


Fig. 34 : spectre des tensions harmoniques du réseau 5,5 kV équipé d'un filtre shunt résonant sur le rang 5 et d'un filtre amorti sur le rang 7.

■ spectres de courants traversant les résistances des filtres amortis et leur valeur efficace globale,

■ contraintes transitoires en tension et en énergie sur les éléments des filtres lors des mises sous tension.

Tous ces calculs, plus délicats, nécessitant tout à la fois la connaissance des réseaux et des matériels, ont en final pour but de définir tous les renseignements électrotechniques composant le cahier des charges nécessaire à la fabrication des filtres.

9 Conclusion

Les convertisseurs statiques de puissance sont de plus en plus présents comme récepteurs-consommateurs dans les réseaux de distribution industrielle, et les fours à arc sont utilisés dans la sidérurgie électrique en pleine croissance.

Tous ces consommateurs produisent une pollution électrique harmonique et nécessitent généralement une compensation de l'énergie réactive qu'ils consomment, d'où l'installation de condensateurs de compensation.

Ces condensateurs, s'ils sont installés sans précaution, peuvent entrer en résonance avec les inductances du réseau et amplifier les perturbations harmoniques.

Ainsi, tout installateur et exploitant d'un réseau industriel peut être confronté à de telles difficultés techniques.

Dans ce cahier technique ont été abordées les principales perturbations harmoniques et les moyens techniques permettant de les limiter.

Cependant sans prétendre être une étude exhaustive du sujet ni être un recueil de toutes les expériences acquises, cet ouvrage devrait permettre sinon de résoudre ces difficultés, du moins de faciliter les échanges techniques avec des spécialistes.

Rappelons qu'il existe chez Schneider Electric une équipe spécialisée dans l'étude des phénomènes électrotechniques sur les réseaux, depuis 1970, au sein de la Direction Scientifique et Technique, ainsi qu'une équipe spécialisée dans la réalisation de filtres (Rectiphase).

Bibliographie

Normes et recommandations

- CEI 60146 : Convertisseurs à semi-conducteurs.
- CEI 60287 : Calcul du courant admissible dans les câbles en régime permanent.
- CEI 60871 : Condensateurs de compensation de tension supérieure à 660 V.
- CEI 61000-2-2 : Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites basse fréquence sur les réseaux publics d'alimentation BT.
- CEI 61000-2-4 : Niveaux de compatibilité dans les installations industrielles pour les perturbations conduites à basse fréquence.
- CEI 61000-3-2 : Limites pour les émissions de courants harmoniques pour les appareils absorbant jusqu'à 16 A par phase.
- CEI 61000-3-4 : Limitation des émissions de courants harmoniques dans les réseaux BT pour les matériels ayant un courant assigné supérieur à 16 A par phase.
- NF C 54-100 : Condensateurs de compensation de tension inférieure à 660 V.
- HN 53 R01 (mai 81) : Rapport d'orientation générale EDF. Aspects particuliers de l'alimentation électrique des équipements informatiques et électroniques sensibles.
- IEEE 519 : Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems - 1992.

Cahiers Techniques Schneider Electric

- Les perturbations électriques en BT.
R. CALVAS, Cahier Technique n° 141
- Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs.
E. BETTEGA, J.N. FIORINA,
Cahier Technique n° 183

Publications diverses

- Direct current transmission, volume 1.
E. W. KIMBARK.
Editeur : J. WILEY and SONS.
- Perturbations des réseaux industriels et de distribution. Compensation par procédés statiques.
Résonances en présence des harmoniques créés par les convertisseurs de puissance et les fours à arc associés à des dispositifs de compensation.
Michel LEMOINE DER EDF.
RGE T 87 n° 12, 12/78.
- Perturbations des réseaux industriels et de distribution. Compensation par procédés statiques.
Perturbations de tension affectant le fonctionnement des réseaux-fluctuations brusques, flicker, déséquilibre et harmoniques.
M. CHANAS SER-DER EDF.
RGE T 87 n° 12, 12/78.
- Pollution de la tension.
P. MEYNAUD SER-DER EDF.
RGE T89 n° 9, 09/80.
- La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels et tertiaires.
Cahiers de l'ingénierie EDF, 12/96 et 04/97.
- Origine et nature des perturbations dans les réseaux industriels et de distribution.
Guy BONNARD SER-DER-EDF.
RGE 1/82.
- Réduction des perturbations électriques sur le réseau avec le four à arc en courant continu.
G. MAURET, J. DAVENE.
IRSID SEE LYON 05/83.
- Line harmonics of converters with DC Motor Loads.
A.DAVID GRAHAM and
EMIL T. SCHONHOLZER
IEEE transactions on industry applications
Vol IA 19 n° 1, 02/83.

■ Filtrage d'harmoniques et compensation de puissance réactive.
Optimisation des installations de compensation en présence d'harmoniques.
P. SGARZI, S.THEOLEYRE.
Journée SEE RGE n° 6, 06/88.

■ Electrical Power Systems Quality.
DUGAN, McGRANAGAN, BEATY.
McGraw-Hill, 1996.

■ Les harmoniques et les installations électriques.
A. KOUYOUMDJIAN.
SCHNEIDER ELECTRIC, 05/98
(réf. MD1HRM1F).

