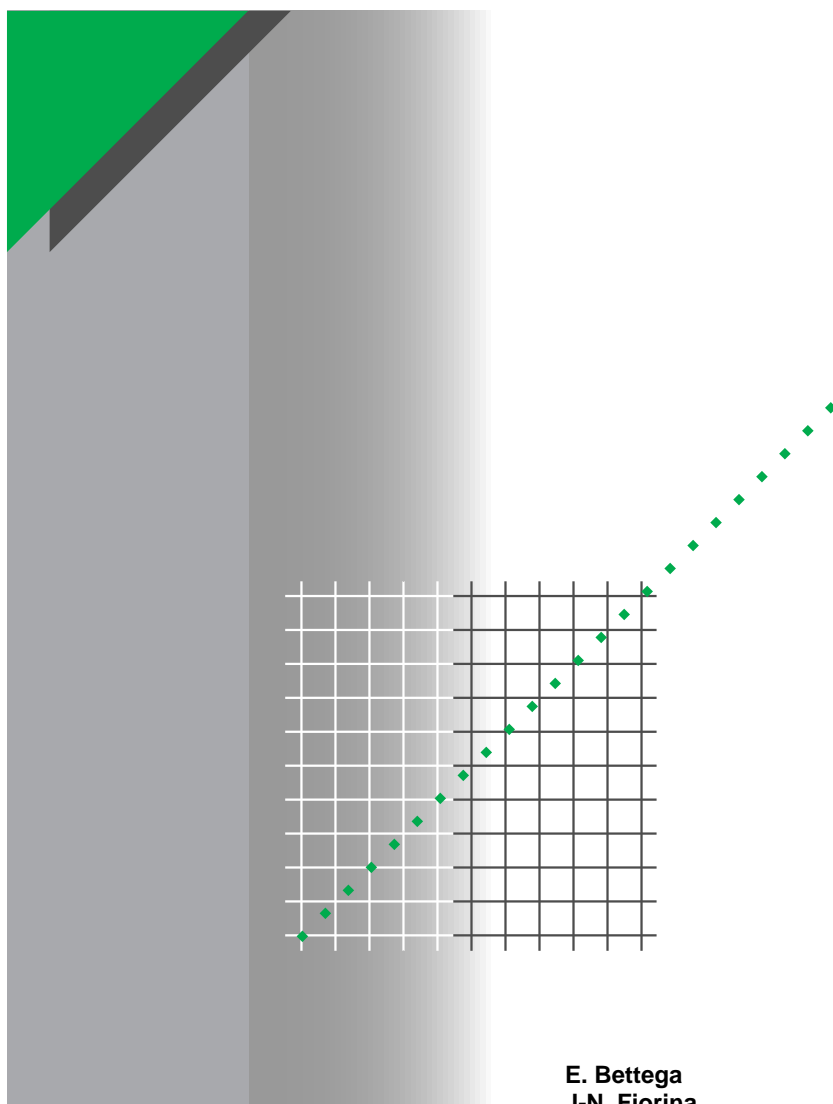


Cahier technique n° 183

Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

E. Bettega
J-N. Fiorina

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.

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

Rubrique : **maîtrise de l'électricité**

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

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

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 n° (à préciser) ».

n° 183

Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs



Eric BETTEGA

Employé comme agent technique au BE électronique ABT de Merlin Gerin en 1983, a rejoint la Direction Scientifique et Technique en 1986. Titulaire depuis 1991 d'un diplôme d'ingénieur CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers), il est, au sein de la Direction des Recherches responsable des études relatives aux « compensateurs actifs ».



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 (Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Radioélectricité de Grenoble), il réintègre le département ACS. D'abord ingénieur de développement, puis chargé de projet, il devient ensuite Responsable Innovations de MGE UPS Systems. Il est en quelque sorte le père des onduleurs de moyenne et forte puissance.

Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs

De plus en plus de récepteurs électriques, dans l'industrie, le tertiaire et même le domestique, sont des charges déformantes (non linéaires). Ils absorbent des courants non sinusoïdaux et ceux-ci, compte tenu des impédances des circuits, déforment l'onde sinusoïdale de tension. C'est la perturbation harmonique des réseaux.

Elle est aujourd'hui préoccupante car génératrice de beaucoup de maux.

Le lecteur, qui n'est pas un spécialiste des harmoniques, est invité à commencer par lire l'annexe ; il trouvera dans celle-ci les bases nécessaires à la compréhension des diverses solutions classiques et nouvelles pour minimiser ou combattre les harmoniques. En effet, il faut connaître, outre les grandeurs caractérisantes, les pollueurs, l'influence des sources et les effets perturbateurs des harmoniques. Enfin, il faut savoir qu'il existe des niveaux de compatibilité (maximums acceptables) fixés par les normes.

Ce Cahier Technique a pour but de vous présenter les compensateurs actifs d'harmoniques. C'est une solution séduisante, souple, car auto-adaptative, qui peut être utilisée dans de nombreux cas en complément ou à la place d'autres remèdes. Ceci étant, il existe des solutions, dites traditionnelles, qu'il faut aussi connaître et utiliser.

Elles sont rappelées dans le premier chapitre.

Sommaire

1 Les solutions traditionnelles	1.1 Réduire les courants harmoniques des charges déformantes	p. 4
	1.2 Abaisser l'impédance harmonique de la source	p. 4
	1.3 Agir sur la structure de l'installation	p. 4
	1.4 Confinement des harmoniques	p. 5
	1.5 Utilisation d'inductances anti-harmoniques	p. 5
	1.6 Filtres passifs d'harmoniques	p. 6
2 Convertisseurs « propres » et compensateurs actifs	2.1 Introduction	p. 7
	2.2 Convertisseurs « propres »	p. 8
	2.3 Le compensateur actif « shunt »	p. 12
3 Compensateurs à structures hybrides	3.1 La structure hybride « parallèle/série »	p. 17
	3.2 La structure hybride « série/parallèle »	p. 18
	3.3 L'association «parallèle » filtres passifs et compensateur actif	p. 19
	3.4 Les performances des structures hybrides	p. 19
4 Mise en œuvre d'un compensateur actif « shunt »	4.1 Objectif et contexte	p. 22
	4.2 Le point d'insertion d'un compensateur « shunt »	p. 23
	4.3 Le dimensionnement d'un compensateur actif « shunt »	p. 24
	4.4 Exemples d'application	p. 25
5 Conclusion		p. 27
Annexe : rappel sur les phénomènes harmoniques	Définition et grandeurs caractéristiques	p. 28
	Origine et transmission	p. 29
	Les charges déformantes	p. 30
	Les effets néfastes des harmoniques	p. 30
	Les normes et recommandations	p. 32

1 Les solutions traditionnelles

Aujourd'hui tout électricien doit les connaître, soit pour prendre les bonnes dispositions lors de l'installation de matériels pollueurs, soit pour concevoir une installation nouvelle en toute connaissance de cause.

Les solutions ci-après sont fonction du but recherché et des pollueurs/pollués en présence.

Elles utilisent des composants passifs : inductances - condensateurs - transformateurs et/ou jouent sur le schéma de l'installation.

Dans la plupart des cas l'objectif est de diminuer le taux de distorsion en tension au niveau d'un point de raccordement de plusieurs charges (d'un tableau de distribution).

1.1 Réduire les courants harmoniques des charges déformantes

A part la solution évidente qui consiste à choisir des matériels non polluants, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs en intercalant entre leur point de raccordement et leur entrée une **inductance dite de lissage**. Cette disposition est utilisée en

particulier avec les redresseurs avec condensateurs en tête ; l'inductance pouvant même être proposée en option par les constructeurs. Attention ! cette solution diminue le taux global de distorsion en tension en amont de l'inductance mais l'augmente aux bornes du récepteur polluant.

1.2 Abaisser l'impédance harmonique de la source

En pratique cela revient à brancher le pollueur directement sur un transformateur le plus puissant possible, ou à choisir un générateur à faible impédance harmonique (cf. annexe et **fig. 1**).

Notons qu'il est intéressant, côté source, d'utiliser plusieurs câbles en parallèle, de sections plus faibles, plutôt que d'en utiliser un seul.

Si ces conducteurs sont suffisamment éloignés, l'inductance apparente est divisée par le nombre de câbles en parallèle.

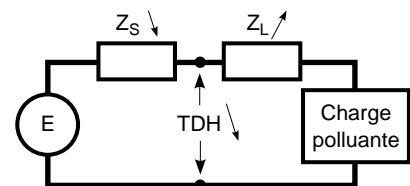


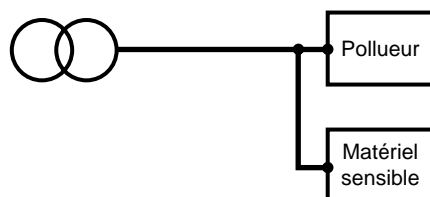
Fig. 1 : Ajouter une inductance aval ou diminuer l'impédance de source amont, entraîne une diminution du TDH de tension au point considéré.

1.3 Agir sur la structure de l'installation

Il faut éviter de connecter un récepteur sensible en parallèle avec un pollueur (cf. **fig. 2**). Une alimentation par câble distinct est préférable.

Quand on est en présence d'un pollueur de forte puissance, il est souhaitable de l'alimenter par un autre transformateur MT/BT.

a) Solution à éviter



b) Solution à préconiser

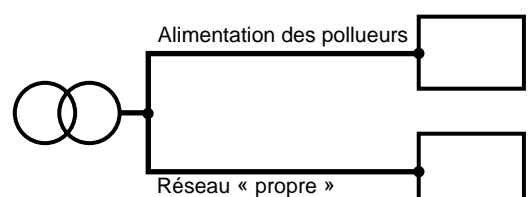


Fig. 2 : Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles.

1.4 Confinement des harmoniques

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation, **à l'aide de transformateurs** à couplages appropriés.

L'utilisation de transformateurs primaire étoile (sans neutre !) et à secondaire ZIG-ZAG est une solution intéressante.

Ce couplage permet d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang $3k$ ne circulent pas au primaire du transformateur et l'impédance Z_s ne dépend plus que des enroulements secondaires. L'inductance est très faible : $U_{ccx} \approx 1\%$ et la résistance est à peu près diminuée de moitié comparée à celle d'un transformateur ΔY de même puissance.

La **figure 3** et le calcul ci-après permettent de comprendre pourquoi les courants de pulsation $3k\omega$ ne se retrouvent pas au primaire du transformateur (courant homopolaire nul). Le courant circulant par exemple dans l'enroulement primaire 1 vaut :

$$\frac{N_2}{N_1} (i_1 - i_3)$$

avec

$$i_1 = I_{1(3k)} = I \sin(3k\omega t)$$

$$i_3 = I_{3(3k)} = I \sin\left(3k\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)\right),$$

$$i_3 = I \sin(3k\omega t) = i_1$$

d'où

$$\frac{N_2}{N_1} (i_1 - i_3) = 0.$$

Dans le cas de charges triphasées il est possible d'éliminer certains rangs d'harmoniques en utilisant des transformateurs ou des autotransformateurs avec plusieurs secondaires déphasés ; cette disposition se rencontre surtout dans le cas de redresseurs puissants.

Le plus connu de ces montages est le redresseur constitué de deux ponts mis en série ou en parallèle, alimentés par un transformateur à deux secondaires dont l'un est en étoile et l'autre en triangle. Cette disposition entraîne un déphasage de 30 degrés entre les tensions des deux

secondaires. Le calcul montre que les harmoniques de rangs $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés au primaire du transformateur. Les premiers harmoniques éliminés, qui sont également les plus importants en amplitude, sont pour $k = 1$, les harmoniques 5 et 7. Les premiers harmoniques présents sont alors le 11 et le 13.

Il est possible de généraliser cette propriété, en augmentant le nombre de redresseurs et le nombre de secondaires du transformateur ou le nombre de transformateurs en choisissant correctement les déphasages relatifs de chacun des secondaires.

Cette solution est largement employée dans le cas de redresseurs de très fortes puissances pour lesquels la répartition des courants dans les différents ponts est facilement réalisable. Elle est couramment utilisée par les redresseurs d'électrolyse (jusqu'à 72 phases !).

Un cas particulier intéressant est obtenu avec les alimentations sans interruption placées en parallèle. Dans ce cas en effet, les onduleurs se répartissent les courants en sortie et les redresseurs qui les alimentent absorbent des courants identiques.

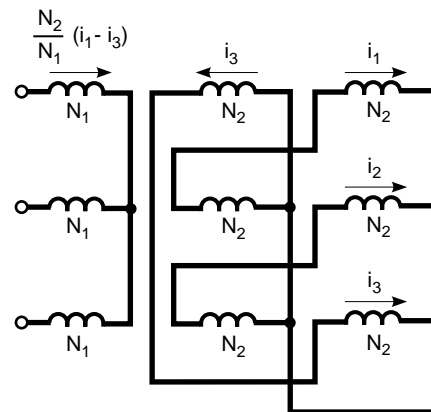


Fig. 3 : Transformateur à secondaire ZIG-ZAG et atténuation des harmoniques de rangs $3k$.

1.5 Utilisation d'inductances anti-harmoniques

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le $\cos \phi$, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents. Les fréquences typiques d'accord sont pour un fondamental 50 Hz : 135 Hz (rang 2,7), 190 Hz (rang 3,8) et 225 Hz (rang 4,5).

Ainsi, pour le fondamental la batterie peut assurer sa fonction d'amélioration du $\cos \phi$, tandis que l'impédance élevée de l'inductance limite l'amplitude des courants harmoniques. Les condensateurs à gradins doivent tenir compte des fréquences de résonance à privilégier.

1.6 Filtres passifs d'harmoniques

A l'inverse du cas précédent il s'agit ici d'utiliser un condensateur en série avec une inductance de façon à obtenir l'accord sur un harmonique de fréquence donnée. Cet ensemble placé en dérivation sur l'installation présente une impédance très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte comme un court-circuit pour l'harmonique considéré. Il est possible d'utiliser simultanément plusieurs ensembles accordés sur des fréquences différentes afin d'éliminer plusieurs rangs d'harmoniques.

Les filtres passifs contribuent à la compensation d'énergie réactive de l'installation.

D'apparence simple ce principe demande toutefois une étude soignée de l'installation car si le filtre se comporte bien comme un court-circuit pour la fréquence désirée, il peut présenter des risques de résonance avec les autres inductances du réseau sur d'autres fréquences et ainsi faire augmenter des niveaux d'harmoniques non gênants avant sa mise en place (cf. Cahier Technique n° 152).

2 Convertisseurs « propres » et compensateurs actifs

2.1 Introduction

Le chapitre précédent nous a permis de rappeler les techniques et les systèmes passifs correspondants, utilisés pour réduire les perturbations harmoniques.

Tous ces systèmes modifient des impédances, des rapports d'impédances ou font s'opposer certains courants harmoniques.

Il existe d'autres voies de contrôle de l'impédance - que nous nous garderons néanmoins de qualifier d'« intelligentes »! - passant par l'utilisation des convertisseurs statiques toujours plus performants, étant donné l'amélioration croissante des possibilités des composants semi-conducteurs de puissance (cf. tableau **fig. 4**).

Les IGBT ont permis le développement industriel de convertisseurs de puissance aptes à garantir la non-pollution au point de raccordement (le prélèvement sinusoïdal), puis la dépollution des réseaux (le filtrage actif).

■ Le prélèvement sinusoïdal est une technique qui permet aux convertisseurs statiques d'absorber un courant très proche d'une sinusoïde, avec, en plus, un cosinus φ proche de l'unité, c'est une technique très intéressante qui devrait être de plus en plus utilisée.

■ Le filtrage actif :

Un compensateur actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de « dépollution harmonique ».

Ce vocable générique regroupe donc en fait une multitude de systèmes, qui se différencient par :

- le nombre de convertisseurs utilisés, et leur mode d'association,
- leur type (source de tension, source de courant),
- les lois de régulation globales (compensation en courant ou en tension),
- l'association éventuelle avec des composants passifs (voire même de filtres passifs).

Le seul trait d'union entre ces systèmes actifs reste le fait que tous génèrent des courants qui s'opposent aux harmoniques créés par les charges non linéaires. La réalisation la plus instinctive est celle illustrée par la **figure 5**, que l'on qualifie habituellement de topologie

Technologie	V	A	F (kHz)
Transistor			
MOS	500	50	50
Bipolaire	1200	600	2
IGBT	1200	600	10
Thyristor			
GTO	4500	2500	1

Fig. 4 : Caractéristiques typiques d'emploi des semi-conducteurs de puissance dans les convertisseurs statiques.

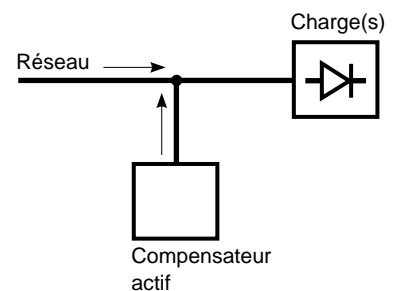


Fig. 5 : Compensateur actif dit « shunt » génère un courant harmonique qui annule les harmoniques de courant coté réseau.

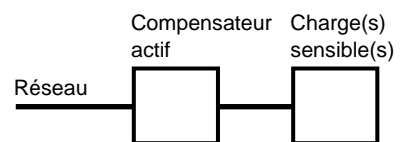


Fig. 6 : Compensateur actif dit « série » génère une tension harmonique qui garantit une tension sinusoïdale aux bornes de la charge.

« shunt » (ou « parallèle »). Son étude détaillée fait l'objet du § 2.3.

Le compensateur actif de type « série » (cf. **fig. 6**) ne sera mentionné que pour mémoire, car très peu usité. Sa fonction est de permettre le raccordement d'une charge sensible sur un réseau pollué, par blocage des sources de tensions harmoniques amont. Mais dans les faits, cette solution de dépollution « amont » ne présente que peu d'attraits, car :

□ la « qualité » de l'énergie au point de livraison est dans la plupart des cas satisfaisante,

- l'insertion d'un composant en mode « série » n'est pas aisée : tenue aux courants de court-circuit par exemple,
- à l'intérieur d'un réseau, il est plus efficace de s'intéresser aux causes mêmes de la distorsion de la tension (les sources de courants harmoniques).

Parmi les nombreuses variantes dites « hybrides », nous nous intéresserons plus particulièrement au type dit « série/parallèle » associant compensateurs actif(s) et passif(s) (cf. **fig. 7**) qui présente un intérêt certain pour la dépollution au plus près de convertisseurs de grosses puissances.

Ce Cahier Technique ne se veut pas exhaustif, et nous passerons volontairement sous silence de nombreuses topologies, car tous les autres systèmes ne sont que des variations sur un même thème ; les solutions de base sont décrites dans ce document.

Avant de présenter plus en détail les convertisseurs propres et les compensateurs actifs, il est intéressant de constater qu'il existe une certaine identité technologique entre ces deux dispositifs. En effet :

- lorsque la stratégie de commande d'un pont redresseur (intégrant, par exemple, un étage élévateur BOOST) impose la circulation d'un courant réduit à son seul fondamental, il s'agit alors de **prélèvement sinusoïdal**, et le redresseur est alors qualifié de **propre**,

- lorsque la consigne de courant appliquée à cette même commande est - par exemple - égale au contenu harmonique du courant absorbé par une charge perturbatrice tierce, alors le redresseur entraîne l'annulation globale des harmoniques au point de couplage : il s'agit là de **compensateur actif**.

Ainsi une même topologie de puissance est susceptible de satisfaire aux deux types de besoins distincts que sont la non-pollution et la dépollution ; seule la stratégie de commande diffère (cf. **fig. 8**).

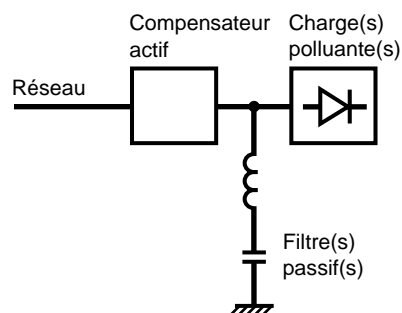
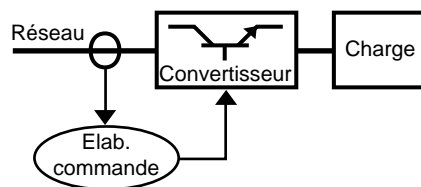


Fig. 7 : Compensateur hybride dit « série/parallèle ».

a) Compensateur « propre »



b) Compensateur actif

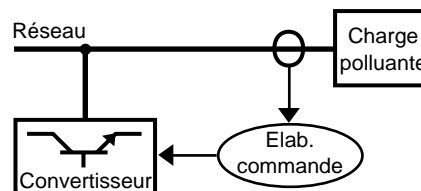


Fig. 8 : Convertisseur « propre » et compensateur actif.

2.2 Convertisseurs « propres »

Qu'il s'agisse de redresseurs, de chargeurs de batteries, de variateurs de vitesse pour moteur à courant continu ou de convertisseurs de fréquence, l'élément en relation directe avec le réseau reste un « redresseur ». C'est ce même composant, et plus généralement l'étage d'entrée (puissance et commande), qui

détermine le comportement harmonique du système complet.

Principe du prélèvement sinusoïdal (en monophasé)

Il consiste à forcer le courant absorbé à être sinusoïdal. Les convertisseurs propres utilisent

de façon générale la technique de commutation dite MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), souvent nommée PWM (Pulse Width Modulation).

Deux grandes familles peuvent être distinguées, selon que le redresseur se comporte comme une source de tension (cas le plus général), ou une source de courant.

■ Convertisseur source de tension

Dans ce cas, le convertisseur se comporte vis-à-vis du réseau comme une force contre-électromotrice, un « générateur de tension sinusoïdale » (cf. **fig. 9**), et le courant sinusoïdal est obtenu en intercalant une inductance entre le réseau et la source de tension.

La modulation de la tension est obtenue par l'intermédiaire d'un asservissement visant à maintenir le courant au plus près de la sinusoïde

de tension souhaitée. Même si d'autres charges non linéaires élèvent le taux de distorsion de la tension du réseau, la régulation peut agir de façon à prélever un courant sinusoïdal.

Les faibles courants harmoniques résiduels ont une fréquence qui est celle de la modulation, et de ses multiples. La fréquence est liée aux possibilités des semi-conducteurs utilisés (cf. **fig. 4**).

■ Convertisseur source de courant

Le convertisseur se comporte dans ce cas comme un « générateur » de courant haché. Un filtre passif relativement conséquent est indispensable pour restituer côté secteur un courant sinusoïdal (cf. **fig. 10**).

Ce type de convertisseur est utilisé dans des applications spécifiques, par exemple pour fournir un courant continu très bien régulé.

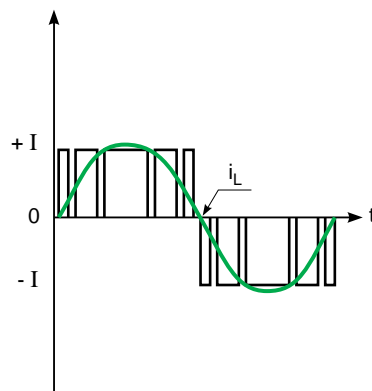
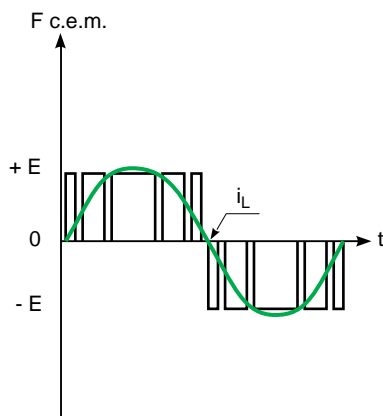
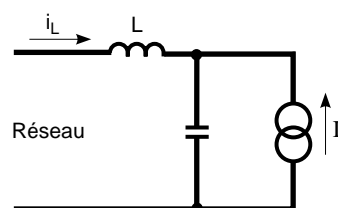
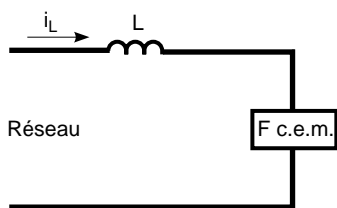


Fig. 9 : Schéma monophasé équivalent à un convertisseur MLI de tension.

Fig. 10 : Schéma monophasé équivalent à un redresseur MLI de courant.

**Principe de mise en œuvre du
« convertisseur de tension »**

En raison de sa simplicité de mise en œuvre, le schéma de la **figure 11** est celui le plus souvent retenu (cf. certaines ASI de MGE UPS Systems). Il utilise le principe du générateur de tension.

Le transistor T (qui est le plus souvent de technologie MOS) et la diode D constituent le modulateur de tension. La tension (u) passe ainsi de 0 à Vs selon que le transistor T est à l'état passant ou bloqué.

Lorsque le transistor T est conducteur, le courant dans l'inductance L ne peut qu'augmenter, puis que la tension v est positive, et que u = 0.

On a alors :

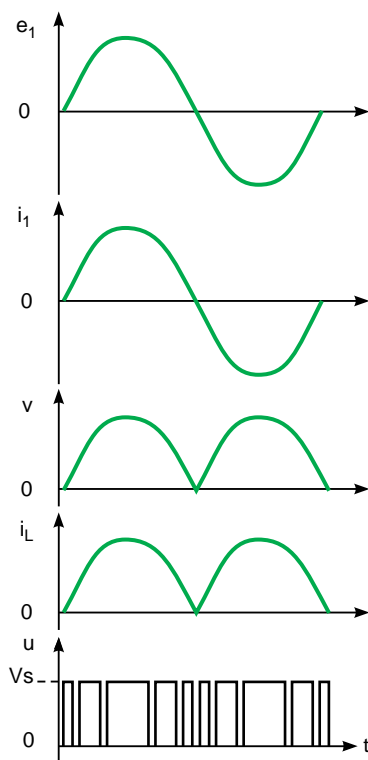
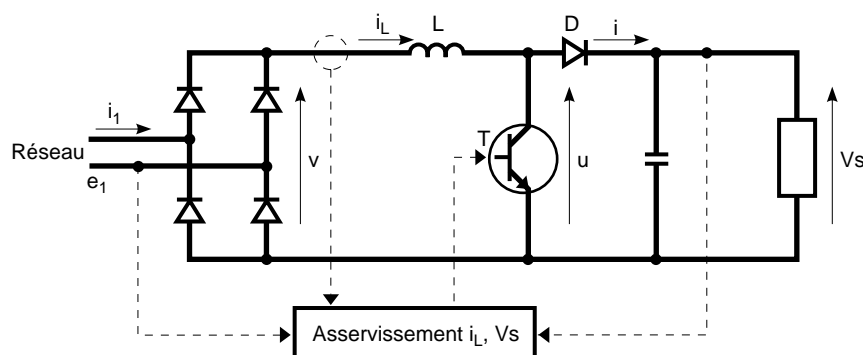
$$\frac{di}{dt} = \frac{e}{L} > 0.$$

Lorsque le transistor T est bloqué, le courant dans L diminue, à condition que Vs soit supérieur à v, de façon à ce que :

$$\frac{di}{dt} = \frac{e - V_s}{L} < 0.$$

Cette condition nécessite que la tension Vs soit supérieure à la tension de crête de v, soit la valeur efficace de la tension alternative, multipliée par $\sqrt{2}$.

Si cette condition est remplie, il est possible à tout instant de faire augmenter ou diminuer le



Vu de la source, le convertisseur doit se comporter comme une résistance : i_1 est sinusoïdal, en phase avec e_1 ($\cos \varphi = 1$). Par commande du transistor T, la régulation force i_L à suivre une consigne de courant du type sinusoïdal redressé double alternance. De ce fait, nécessairement, la forme de i_1 est sinusoïdale et en phase avec e_1 . De plus, pour maintenir en sortie la tension Vs à sa valeur nominale, la régulation agit sur la valeur moyenne de i_L .

Fig. 11 : Schéma de principe du redresseur monophasé à prélèvement sinusoïdal.

courant dans L. En contrôlant les temps respectifs de conduction et de blocage du transistor T, il est ainsi possible de forcer l'évolution temporelle du courant dans L. La **figure 12** montre comment évolue le courant i_L par rapport à une valeur de référence.

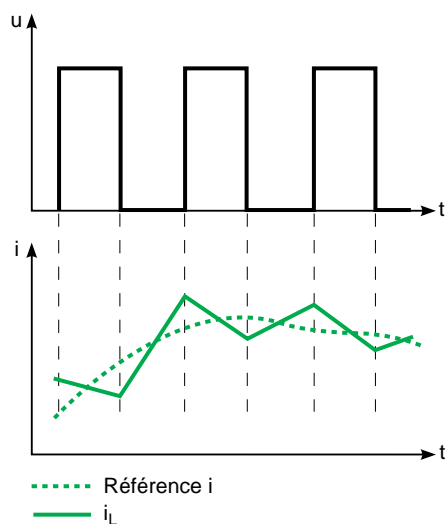


Fig. 12 : Evolution du courant i_L - par rapport à la référence.

Les écarts de i_L par rapport à la sinusoïde sont d'autant plus réduits que les instants de commutation de T sont rapprochés, c'est à dire que la fréquence de découpage est élevée. Dans ce cas, le courant i_L est très proche du courant sinusoïdal redressé, et le courant de ligne i_1 est alors nécessairement sinusoïdal.

La **figure 13** représente l'allure temporelle et le spectre harmonique du courant prélevé par un redresseur propre d'une ASI de 2,5 kVA. Le transistor est ici un MOS, et la fréquence de découpage est égale à 20 kHz.

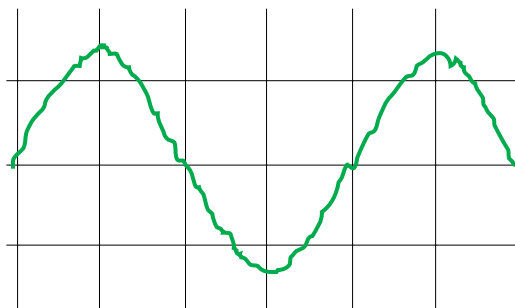
Les harmoniques du courant absorbé sont très atténués par rapport à une alimentation à découpage qui n'utilise pas la stratégie de commande « prélèvement sinusoïdal » et leur niveau est au dessous de ce qu'autorise la norme. Le filtrage des rangs ≥ 20 kHz est facile, et peu onéreux.

Montages triphasés

Le montage de base est représenté sur la **figure 14**.

Nous retrouvons ici le montage de la figure 11, dans lequel la self est placée en amont des redresseurs; le principe de fonctionnement est le même. Le système de contrôle pilote chaque bras de puissance, et force le courant absorbé sur chaque phase à suivre la consigne sinusoïdale. Aujourd'hui il n'existe pas de convertisseurs triphasés propres sur le marché car le surcoût est important. L'évolution de la normalisation peut l'imposer.

a) Forme temporelle



b) Décomposition spectrale

Rang	Contrib. max. en % de I1 selon CEI 1000-3-2	Valeurs typiques sans prélèvement sinusoïdal ($U_{ccx} = 1\%$)	Valeur mesurée
3	14,65%	81%	8,03%
5	7,26%	52%	2,94%
7	4,90%	24%	3,15%
9	2,55%	6%	1,65%
11	2,10%	7%	1,09%
13	1,34%	6%	1,07%

Fig. 13 : Courant amont d'un redresseur monophasé « propre » (ASI de 2,5 kVA -type PULSAR-PSX-).

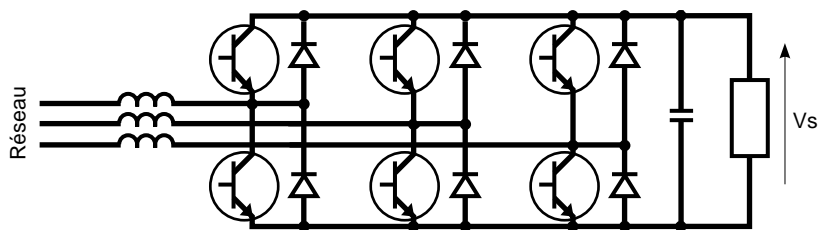


Fig. 14 : Redresseur triphasé à prélèvement sinusoïdal.

2.3 Le compensateur actif « shunt »

Principe de fonctionnement

Nous pouvons illustrer le concept de compensateur actif « shunt » à travers l'analogie électroacoustique (cf. **fig. 15**). L'observateur n'entend plus la source de bruit S si une source de bruit secondaire S' génère un contre-bruit. Les ondes de pression générées par le haut-parleur sont de même amplitude et en

opposition de phase avec celles de la source, c'est le phénomène d'interférences destructrices. Cette analogie permet d'illustrer le concept même du compensateur actif « shunt » : l'objectif est de minimiser - sinon d'annuler - au point de raccordement les harmoniques du courant (ou de la tension), par injection d'un courant (ou d'une tension) « ad-hoc » (cf. **fig. 16**).

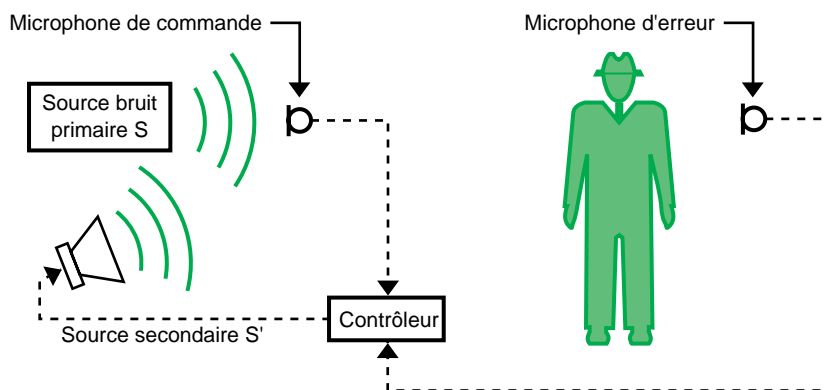


Fig. 15 : Principe du contre-bruit acoustique.

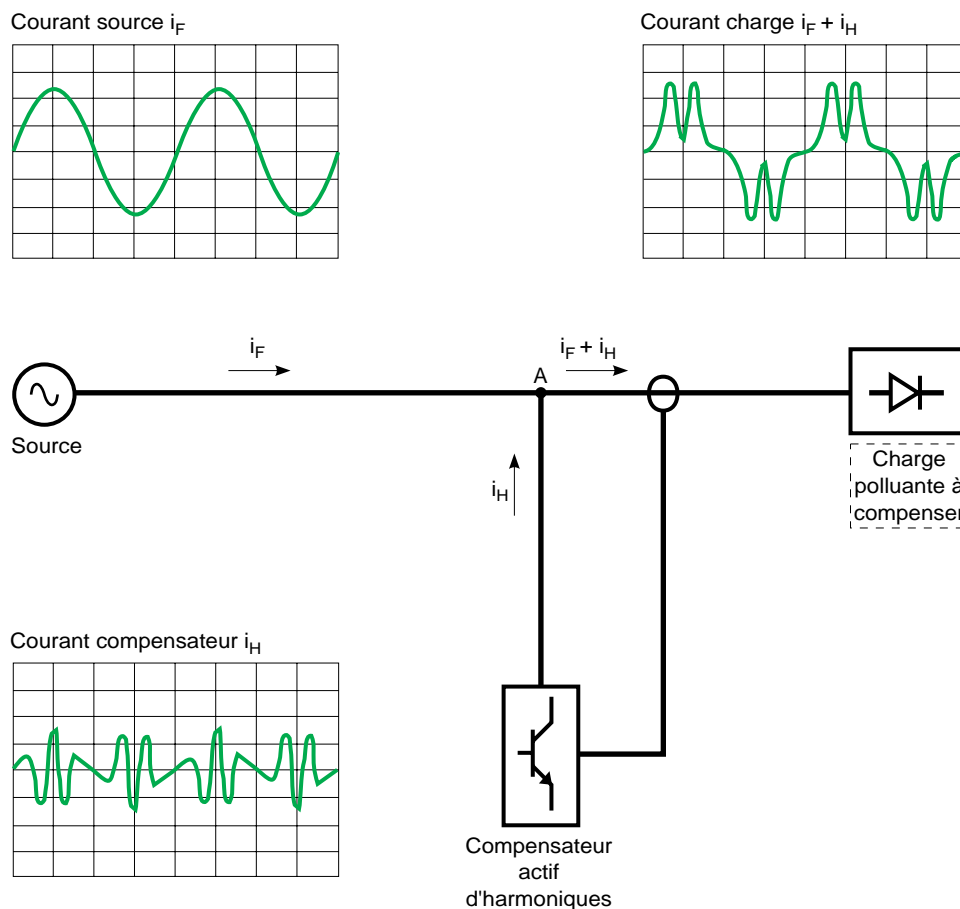


Fig. 16 : Principe de la compensation des composantes harmoniques par compensateur actif « shunt ».

Sous réserve que le dispositif soit apte à injecter **à tout instant** un courant dont chaque composante harmonique est de même amplitude que celle du courant dans la charge, et de phase opposée, alors la loi de sommation des courants en A garantit que le courant fourni par la source est purement sinusoïdal.

L'association « charges perturbatrices + compensateur actif » constitue une charge linéaire (dans laquelle courant et tension sont liés par un coefficient k). Ce type de dispositif est particulièrement bien adapté à la dépollution des réseaux BT, et ce quel que soit le point de raccordement choisi et le type de charge (car ce dispositif est auto-adaptatif).

Nous réalisons ainsi selon le niveau d'insertion :

- une dépollution locale : si le compensateur est associé à une charge perturbatrice,
- une dépollution globale : si le raccordement est réalisé - par exemple - au niveau du TGBT (Tableau Général Basse Tension) de l'installation.

Le compensateur actif « shunt » constitue donc une source de courant indépendante de l'impédance réseau, et qui présente les caractéristiques intrinsèques suivantes :

- sa bande passante est suffisante pour garantir la suppression des composantes harmoniques majoritaires (en termes statistiques) du courant de la charge. Typiquement, nous considérons que la plage $H_2 - H_{23}$ est satisfaisante ; car plus le rang est élevé, plus le niveau de l'harmonique est faible ;

- son temps de réponse est tel que la compensation harmonique soit effective non seulement en régime établi, mais encore en régime transitoire « lent » (quelques dizaines de ms) ;

- sa puissance permet d'atteindre les objectifs de dépollution fixés, ce qui ne signifie pas nécessairement la compensation totale et permanente des harmoniques générés par la (ou les) charge(s).

Sous réserve que ces trois objectifs soient simultanément atteints, alors le compensateur actif « shunt » constitue un excellent dépollueur, car auto-adaptatif, et ne présentant aucun risque d'interaction avec l'impédance réseau.

Notons également que la fonction principale de ce dispositif n'est pas de rephaser les composantes fondamentales de U et I : l'insertion d'un compensateur actif est sans incidence sur le $\cos \phi_1$. Néanmoins, si la charge traitée est du type « redresseur polyphasé », alors il s'avère effectivement que le facteur de puissance global est sensiblement amélioré, du fait que le facteur de déformation se rapproche de l'unité et que le $\cos \phi_1$ d'un redresseur (non commandé) est proche de l'unité. Mais il s'agit plus là d'un « effet de bord » que d'un objectif désigné !

Bien que l'objectif premier soit la dépollution harmonique, la même structure peut assurer la compensation du $\cos \phi$. Dans ce cas, la part du courant réactif pouvant être importante, il y a lieu d'en tenir compte dans le dimensionnement du produit en courant nominal.

Structure du compensateur actif « shunt »

Le compensateur shunt se décompose en deux sous-ensembles, à savoir (cf. **fig. 17**) :

- la puissance : filtre d'entrée, onduleur réversible, éléments de stockage,
- la commande : élaboration des consignes, régulations U/I, commande rapprochée du convertisseur.

Par rapport au convertisseur à prélèvement sinusoïdal, évoqué dans le chapitre précédent, la différence essentielle se situe au niveau du contrôle-commande (car la consigne n'est plus une sinusoïde 50 Hz). Si l'élément de « stockage » est un condensateur ou une batterie, la structure du convertisseur est similaire à celle de l'étage d'entrée du convertisseur à prélèvement sinusoïdal (cf. **fig. 18**).

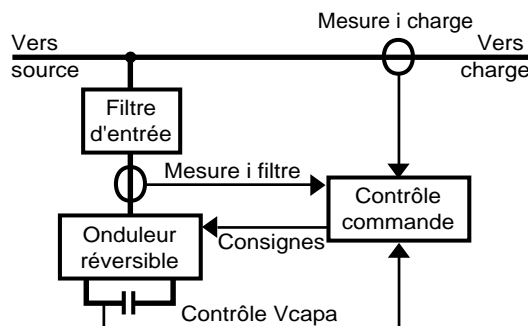


Fig. 17 : Structure de principe du compensateur actif « shunt ».

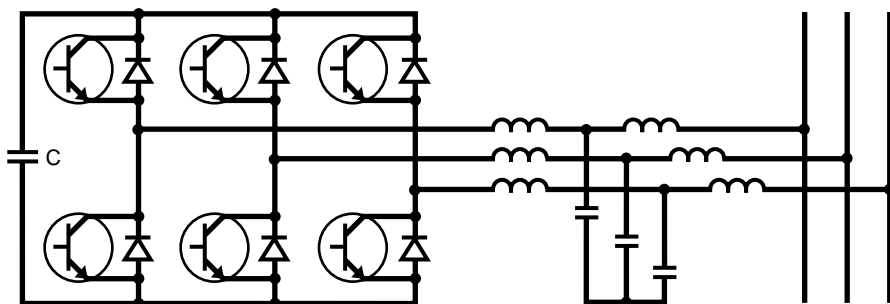


Fig. 18 : Schéma du compensateur actif « shunt » à stockage capacitif.

Celui-ci peut également être réalisé à l'aide d'une inductance (cf. **fig. 19**).

Dans le cadre de la gamme SINEWAVE, Merlin Gerin a choisi le stockage capacitif, car il est plus intéressant (en termes techniques et économiques) : bande passante plus large, filtre d'entrée plus simple.

De plus, la structure « capacitive » est techniquement très proche des onduleurs (mutateurs).

L'électronique de contrôle-commande

Elle a pour rôle essentiel de piloter les semi-conducteurs de puissance et, pour ce faire, elle doit :

- piloter la charge des condensateurs (c) à la mise sous tension,
- réguler la tension aux bornes de c,
- générer des ordres de conduction et de blocage du « redresseur » dans son fonctionnement en mutateur, de telle façon que, à chaque instant, le compensateur actif fournisse un courant qui compense les courants harmoniques pollueurs (cf. **fig. 16**).

Il existe 2 méthodes de traitement du signal :

- la première est qualifiée de temps réel, elle est particulièrement adaptée aux cas de charges qui

présentent des variations très rapides de leur spectre harmonique.

Elle peut utiliser la méthode dite « détection synchrone » ou exploiter les transformations de Clark ;

- la deuxième est qualifiée de temps différé, elle est adaptée aux cas des charges dont le contenu harmonique du courant absorbé varie peu en 0,1 s. Elle utilise le principe de l'analyse fréquentielle et s'appuie sur la transformée de Fourier rapide (FFT).

Cette méthode permet un traitement global ou sélectif des rangs harmoniques.

Exemples de performances obtenues avec des récepteurs non linéaires

Dans ces exemples, les récepteurs ne fonctionnent pas à pleine charge, car le TDH est minimum à pleine charge. Dans l'exemple qui suit, le TDH est de 30 % à pleine charge alors qu'il est de 80 % avec une charge de 20 %.

- Cas d'une ASI

Un compensateur actif « shunt » est connecté en parallèle sur une alimentation sans interruption triphasée d'une puissance de 120 kVA. Les formes temporelles de courant sont celles de la **figure 20**. Le spectre du courant absorbé par

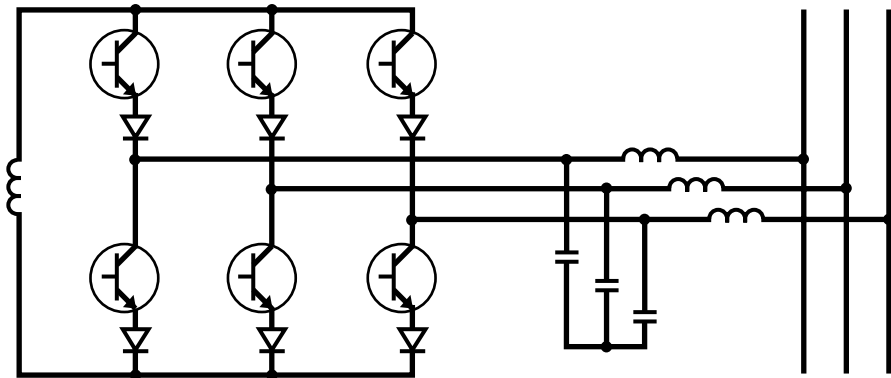
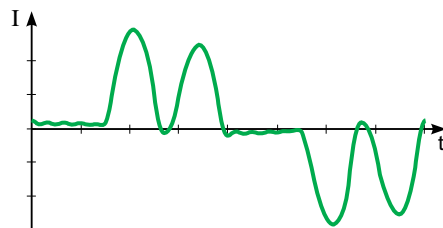


Fig. 19 : Schéma du compensateur actif « shunt » à stockage inductif.

a) Courant charge (TDH = 80 %, $I_{eff.} = 44$ A)



b) Courant source (TDH = 4,6 %, $I_{eff.} = 35$ A)

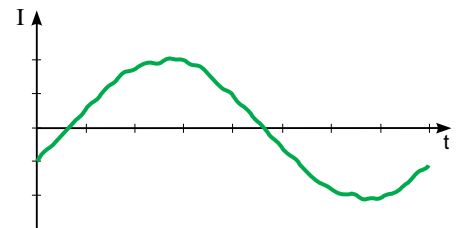


Fig. 20 : Compensateur actif « shunt » associé à une ASI - formes temporelles des courants (charge 20 %).

la charge est donné en **figure 21** ; il correspond à une distorsion harmonique de 80,8 %. La mise en service du compensateur actif « shunt » entraîne une forte atténuation du TDH (I), celui-ci étant réduit de 80 % à 4,6 %. Le courant efficace baisse de près de 20 %, et le facteur de puissance croît de 30 %. (cf. **fig. 21** et **22**).

■ Cas d'un convertisseur de fréquence
Un compensateur actif est connecté en parallèle sur un variateur de vitesse pour moteur asynchrone d'une puissance de 37 kW fonctionnant à mi-charge. Les formes temporelles du courant sont celles de la **figure 23**, correspondant à une distorsion harmonique de 163 % pour le courant charge.

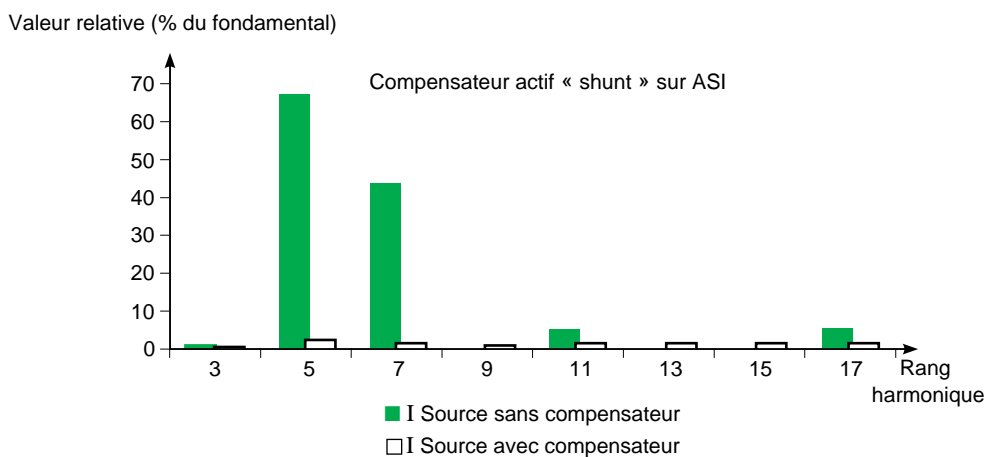


Fig. 21 : Spectre des courants sources.

Caractéristiques du courant	Sans compensateur actif	Avec compensateur actif
I _{eff} (A)	44,1	35,2
Facteur de crête	1,96	1,52
THD (I) en %	80,8	4,6
Facteur de puissance	0,65	0,86
cos (φ ₁)	0,84	0,86
I _{eff} harmonique (A)	27,7	1,6

Fig. 22 : Compensateur actif « shunt » sur ASI : valeurs mesurées.

a) Courant charge (TDH = 163 %, I_{eff.} = 25 A)

b) Courant source (TDH = 22,4 %, I_{eff.} = 15,2 A)

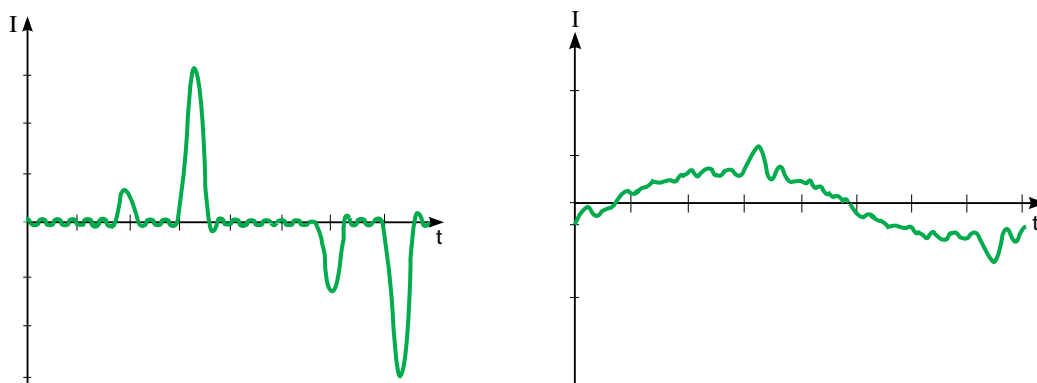


Fig. 23 : Compensateur actif « shunt » sur variateur de vitesse - formes temporelles des courants à mi-charge.

La **figure 24** montre le spectre harmonique des courants source et charge.

La mise en service du compensateur actif « shunt » entraîne une forte atténuation du TDH (I), celle-ci étant réduite à 22,4 %. Le courant efficace baisse de près de 40 % (cf. **fig. 24** et **25**).

Les performances sont moindres que dans le cas précédent, (ASI) car les fluctuations du courant ligne sont beaucoup plus rapides. Dans ce cas particulier, on a intérêt à rajouter une self en ligne de 0,3 mH. Le tableau de la **figure 26** traduit bien une efficacité accrue. On peut conclure que le compensateur « shunt » est

excellent pour dépolluer un départ ou un récepteur non linéaire ; il faut toutefois noter :

- que la dépollution totale, si elle est possible, n'est pas nécessairement l'objectif,
- qu'il est mal adapté aux réseaux de tension supérieure à 500 V,
- qu'il est inefficace vis à vis de la pollution qui peut exister en amont du capteur de courant,
- que le bilan technico-économique peut conduire à utiliser, en associations un composant passif ; par exemple une self (cf. **fig. 26**) ou un filtre passif chargé d'éliminer l'harmonique 3 ou 5 (diminution significative de la puissance du compensateur « shunt »).

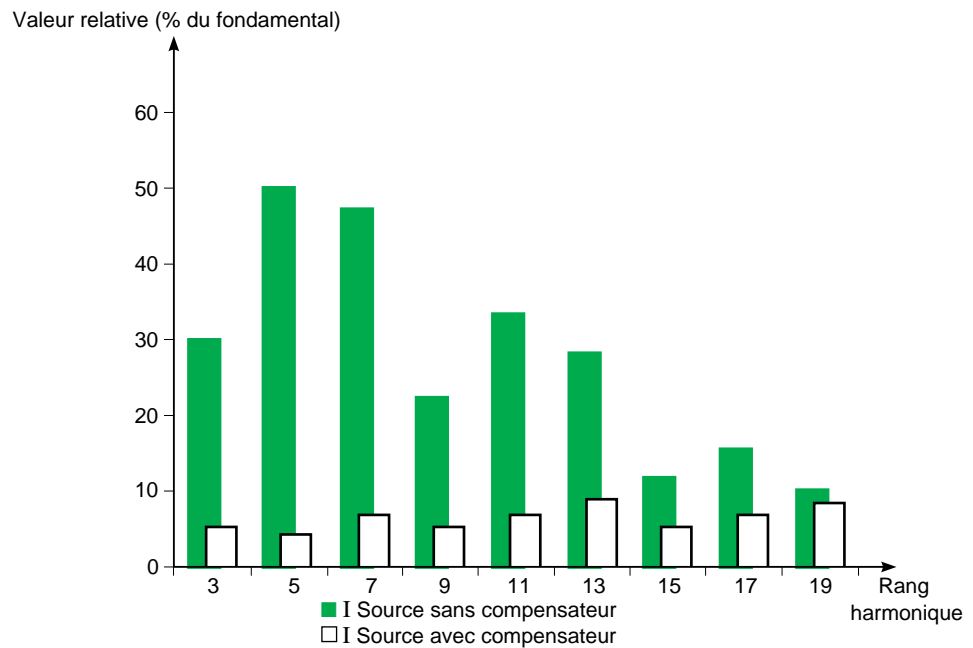


Fig. 24 : Compensateur actif « shunt » associé à un variateur de vitesse - spectre harmonique du courant source.

Caractéristiques du courant à mi-charge	Sans compensateur actif	Avec compensateur actif
I _{eff} (A)	25,9	15,2
Facteur de crête	3,78	1,95
TDH (I) en %	163	22,4
I _{eff} harmonique (A)	21,7	3,3

Fig. 25 : Compensateur actif « shunt » associé à un variateur de vitesse - caractéristiques du courant.

Caractéristiques du courant à pleine charge	Avec compensateur actif et self en ligne
I _{eff} (A)	57,6
Facteur de crête	1,46
TDH (I) en %	3,4
I _{eff} harmonique (A)	2

Fig. 26 : Compensateur actif « shunt » associé à un variateur de vitesse - avec self en ligne - caractéristiques du courant.

3 Compensateurs à structures hybrides

Les besoins, en termes de dépollution harmonique sont multiples, car on peut souhaiter garantir :

- la non-pollution d'un réseau « propre » par une charge perturbatrice,
- le bon fonctionnement d'une charge sensible (ou d'un réseau sensible) dans un environnement pollué,
- les deux objectifs précédents de façon simultanée !

Le problème de dépollution peut ainsi se traiter à deux niveaux (exclusifs ou combinés) :

- dépollution parallèle par source de courant en aval du point considéré : c'est la solution « shunt » décrite dans le chapitre précédent,
- dépollution série par mise en œuvre d'une source de tension en amont.

Les structures que nous qualifierons d'« hybrides » dans la suite de cet exposé sont celles qui combinent en fait la mise en œuvre simultanée des deux solutions, la **figure 27** en est un exemple.

Elles utilisent des filtres passifs et des compensateurs actifs. Les variantes identifiées sont multiples, nous en présenterons trois.

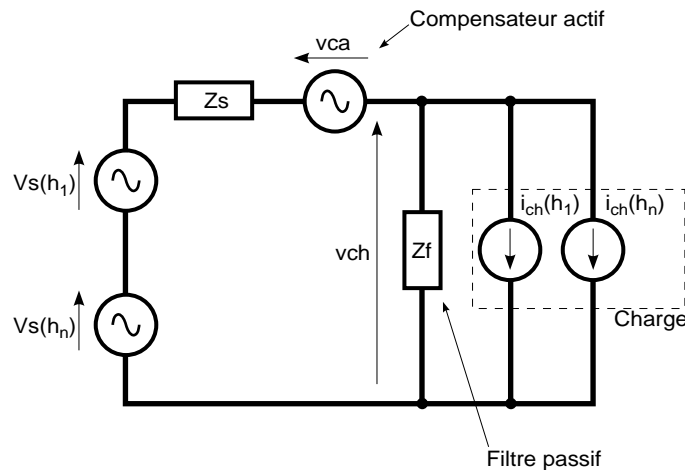


Fig. 27 : Compensateur hybrides actif/passifs - exemple.

3.1 La structure hybride « parallèle/série »

Sur le schéma de la **figure 28** sont représentés les principaux sous-ensembles de cette structure, à savoir :

- une (ou plusieurs) batterie(s) de filtres passifs résonnants (Fi), connectés en parallèle avec la (les) charge(s) perturbatrice(s) ;
- un compensateur actif, constitué par :
 - un coupleur magnétique (Tr), dont le primaire est inséré en série avec le(s) filtre(s) passif(s),
 - un mutateur (MUT), connecté au secondaire du coupleur magnétique.

Le compensateur actif est commandé de façon telle que :

$$V_{fa} = K \times I_{SH}$$

où :

V_{fa} : tension aux bornes du coupleur magnétique,
 K : valeur en « ohm », fixée pour chaque rang,
 I_{SH} : courant harmonique provenant de la source.

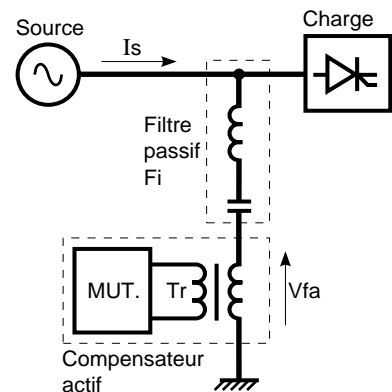


Fig. 28 : Compensateur hybrides dit « parallèle/série » - schéma unifilaire.

Dans cette configuration, le compensateur n'agit que sur les courants harmoniques, et améliore l'efficacité des filtres passifs :

- il évite l'amplification des tensions harmoniques amont aux fréquences d'antirésonance des filtres passifs,
- il atténue fortement les courants harmoniques entre charge et source par « abaissement » de l'impédance globale (filtres passifs plus compensateur actif).

Puisque le compensateur actif n'est pas traversé par la totalité du courant réseau, son dimensionnement (et en particulier celui du coupleur magnétique) peut être réduit.

Cette structure est donc bien adaptée à traiter les réseaux de puissance et tension élevées, tout en assurant le rephasage des composantes fondamentales.

Son principal inconvénient est que les filtres passifs sont définis en fonction de la nature de chaque charge : une étude préalable est impérative.

Enfin, la quasi-totalité des tensions harmoniques préexistantes (sur la source) sont présentes côté charge. Dans ce sens, cette configuration peut être assimilée au compensateur actif de type « shunt ».

3.2 La structure hybride « série/parallèle »

Le schéma de la **figure 29** montre que nous retrouvons là les principaux sous-ensembles de la structure précédente, la seule différence résidant dans le point de connexion du primaire du coupleur (en série entre source et charge). La loi de commande du compensateur actif est inchangée, et traduit qu'en fait le compensateur actif développant une tension s'oppose à la circulation des courants harmoniques vers la source. Il se comporte donc comme une impédance (de valeur K fixée pour chaque rang) pour les fréquences harmoniques.

De ce fait, le filtrage passif est plus efficace (car la présence de cette « impédance » série force la circulation des courants harmoniques de la charge vers les filtres passifs). De plus, le filtre série permet d'isoler la charge des composantes harmoniques préexistantes sur la source, et interdit toute surcharge des filtres passifs.

Cette topologie est donc en fait le plus souvent qualifiée d'« isolateur harmonique », car isolant - en quelque sorte - la source d'une charge perturbatrice, et inversement elle permet d'éviter la surcharge d'un filtre passif par une pollution amont.

Il convient de noter que cette topologie induit des contraintes de dimensionnement et de protection du coupleur magnétique, car :

- par ce dernier transite le courant total de la charge,
- il est soumis en cas de court-circuit à une onde de courant de valeur très importante.

Une issue à ces deux problèmes peut être d'utiliser un transformateur avec un enroulement secondaire supplémentaire (cf. **fig. 30**).

La compensation s'effectue alors par voie « magnétique » par action directe sur le flux.

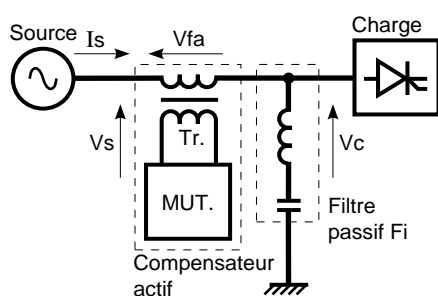


Fig. 29 : Compensateur hybrides de type « série/parallèle ».

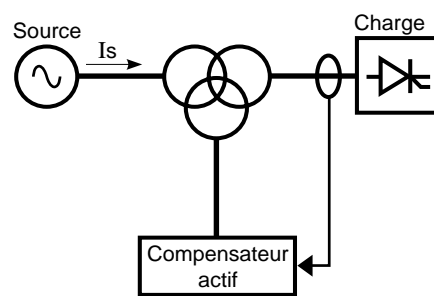


Fig. 30 : Compensateur hybride avec injection par transformateur.

3.3 L'association « parallèle » filtres passifs et compensateur actif

Son principe consiste à connecter en mode « parallèle » un (ou plusieurs) filtre(s) passif(s) accordé(s), et un compensateur actif « shunt » (cf. **fig. 31**).

Ici encore le compensateur actif et le filtre passif complètent leurs actions. Il peut être intéressant de limiter (par utilisation de la technique FFT) l'action du compensateur actif aux seuls rangs non traités par les filtres passifs.

Cette structure permet selon le cas :

- d'améliorer la dépollution obtenue avec les filtres passifs seuls,
- de limiter le nombre de rangs de filtres passifs,
- d'améliorer les performances du compensateur actif seul (pour une même puissance efficace du compensateur actif).

Ceci étant, cette combinaison ne permet pas d'éviter les surcharges des filtres passifs, ni les effets de l'antirésonance avec l'impédance réseau.

En résumé

Ces structures hybrides ne présentent pas le caractère « universel » du compensateur actif « shunt », puisqu'il est nécessaire de choisir les filtres passifs (en terme de type, nombre de rangs, et fréquences d'accord) en fonction de la nature des courants harmoniques générés par la charge. La présence du compensateur actif

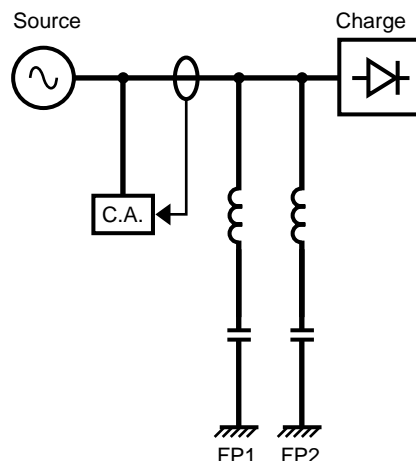


Fig. 31 : Association « parallèle » compensateur actif et filtres passifs - principe.

minimise le dimensionnement des filtres passifs et complète leurs effets.

Inversement, dans une installation existante, le rajout d'un compensateur actif de puissance réduite permet d'améliorer l'efficacité des filtres passifs existants.

3.4 Les performances des structures hybrides

Des prototypes ont été conçus, réalisés et testés en collaboration avec Electricité de France. Ils comportaient deux batteries de filtres passifs résonnants accordés sur les rangs 5 et 11 (dépollution d'une charge de type ASI) ou 5 et 7 (charge type variateur).

Ci-après le résultat des essais concernant l'association de deux compensateurs hybrides avec un convertisseur de fréquence (variateur de vitesse pour moteur asynchrone) :

Configuration « parallèle/série »

(cf. **fig. 28**)

Les caractéristiques du circuit d'essai sont précisées sur le tableau de la **figure 32**.

Commentaires :

Cette topologie n'est pas adaptée pour traiter un réseau à fort taux de pollution de la tension amont ; néanmoins ses performances

Caractéristiques du circuit

Source	400 V, tri, 600 kVA, 5 %, TDH (Vs) < 1,5 %
Charge	130 kW, charge 70 %, self ligne 0,15 mH.

Mesures effectuées

TDH (Ich)	35 %
TDH (Is)	9 %
TDH (Vch)	2 %

Fig. 32 : Compensateur « parallèle/série » - caractéristiques et résultats.

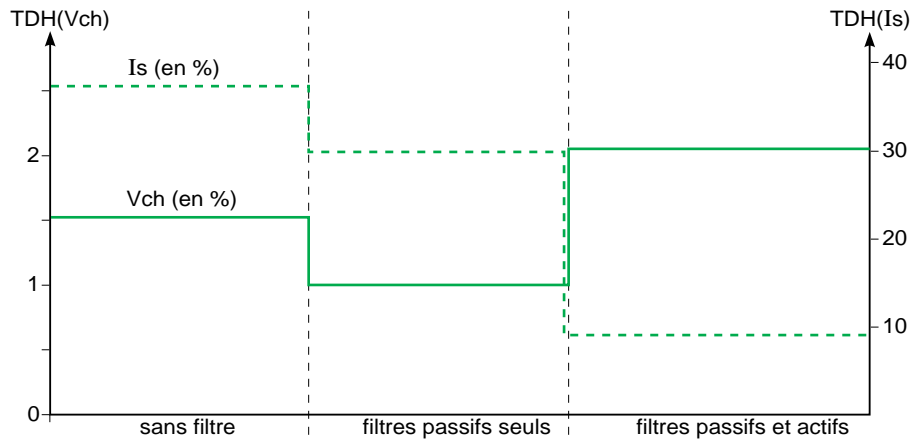


Fig. 33 : Compensateur hybride dit « parallèle/série » associé à un variateur de vitesse - évolution du TDH (Vch) et du TDH (Is).

« courant » sont tout à fait honorables (le TDH (I) est ramené de plus de 35 % à 9 %), (cf. **fig. 33**). Elle est donc particulièrement adaptée au traitement des réseaux à faible taux de pollution amont, ou pour lesquels l'insertion d'un élément en série présente des difficultés particulières.

Configuration « série/parallèle »
(cf. **fig. 29**)

Les caractéristiques du circuit d'essai sont précisées sur le tableau de la **figure 34**.

Commentaires :

Les performances sont également tout à fait satisfaisantes, même si la qualité de la tension source (TDH (u) très faible) ne permet pas d'apprécier les performances en terme d'isolement. Le TDH du courant source est néanmoins ramené de plus de 35 % à 11 % (cf. **fig. 35**). Le courant des filtres

Caractéristiques du circuit

Source	400 V, tri, 600 kVA, 5 %, TDH (Vs) < 1,5 %
Charge	130 kW, charge 70 %, self ligne 0,15 mH.

Mesures effectuées

TDH (Ich)	35 %
TDH (Is)	11 %
TDH (Vch)	2,1 %

Fig. 34 : Compensateur hybride, dit « série/parallèle » - caractéristiques et résultat.

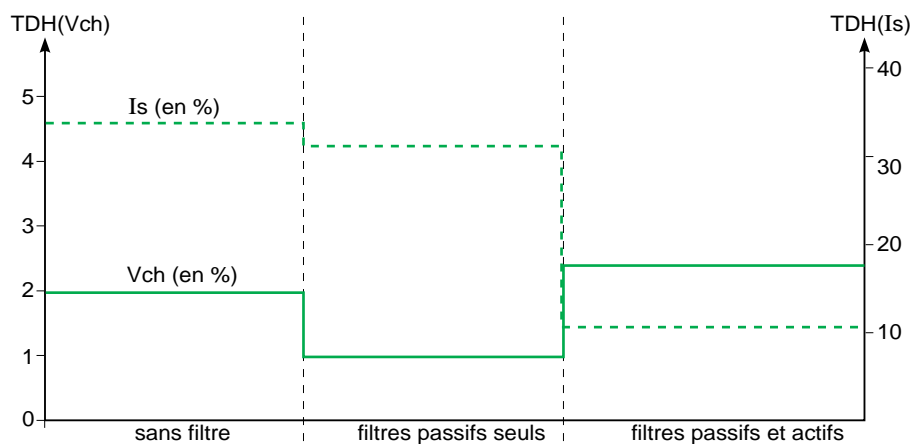


Fig. 35 : Compensateur hybride dit « série/parallèle » - associé à un variateur - relevé du TDH (Vch) et du TDH (Is).

passifs reste constant, ce qui traduit bien l'isolement vis à vis de la source. Des essais complémentaires ont montré qu'en cas de très forte distorsion amont (TDH (U) = 11 %), la qualité de la tension aux bornes de la charge restait bonne (TDH(U_{CH}) = 4,7 %).

Caractéristiques des solutions actives

A ce stade, nous avons traité des filtres actifs série et parallèle et des structures hybrides...

Pour conclure ce chapitre, il est intéressant de faire une synthèse des qualités de ces différentes « solutions actives » de lutte contre la pollution harmonique...

Le tableau de la **figure 36** permet de constater que, sauf cas particulier, c'est le C.A. « shunt » et la structure parallèle qui sont les solutions les plus intéressantes en basse tension.


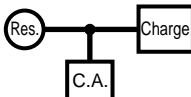
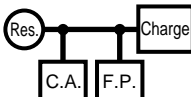
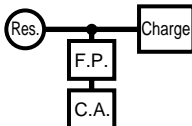
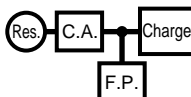
Type de compensateur ⇒	« Série »	« Shunt »	Hybride « parallèle »	Hybride « parallèle/série »	Hybride « série/parallèle »
Critère ↓					
Structure de principe					
Action sur	Uh/source	Ih/charge	Ih/charge	Ih/charge	Ih/charge, Uh/source
Performance	+++	+++	+++	++	++
Dimensionnement C.A.	fond. + harm.	harm.	harm.	harm.	fond. + harm.
Impact d'un court-circuit	fort	aucun	aucun	aucun	fort
Insertion	difficile	simple	simple	simple	difficile
Amélioration du cos φ ₁	non	possible	oui	oui	oui
Evolutivité	non	oui	oui	non	non
Risque de résonance	sans objet	sans objet	oui	non	non

Fig. 36 : Synthèse des différentes « solutions actives » de lutte contre la pollution harmonique.

4 Mise en œuvre d'un compensateur actif « shunt »

Remarque liminaire : notre objectif n'est pas ici de donner un « guide de sélection » entre les différents types de dépollueurs harmoniques, tant actifs que passifs, mais plutôt de montrer les critères de dimensionnement et d'insertion des compensateurs actifs.

Un guide de choix supposerait de plus que les différentes solutions exposées soient disponibles en termes de produits.

Aujourd'hui tant les solutions « traditionnelles » que les solutions hybrides nécessitant des

études sérieuses et une solution adaptée, seuls les compensateurs actifs shunts sont commercialisés (étude simple).

Ainsi, nous nous attacherons plus particulièrement à identifier les principaux paramètres que l'utilisateur - potentiel - de compensateurs actifs se doit de connaître et de renseigner, afin d'être à même d'effectuer un choix pertinent.

4.1 Objectif et contexte

Connaître les « mécanismes »

La difficulté majeure des phénomènes harmoniques est certainement liée à leur très faible visibilité : en effet, s'il est souvent facile de constater une dégradation de la qualité de l'onde (de tension et/ou de courant) en un ou plusieurs points, la fonction combinatoire entre les différentes sources (autonomes ou non), charges, et la topologie du réseau n'est pas triviale !

De plus, l'association entre les phénomènes harmoniques (souvent ignorés) et les dysfonctionnements constatés dans les constituants du réseau (souvent aléatoires) n'est pas instinctive.

Connaître le réseau et sa topologie

Le premier pré-requis est donc relatif à l'environnement du réseau : la mise en œuvre d'un dépollueur requiert une connaissance de l'ensemble du réseau (sources, charges, lignes, condensateurs), et pas seulement une vision fragmentaire limitée à la seule zone susceptible. Ce schéma unifilaire est - en quelque sorte - le premier composant de notre « boîte à outils ».

Faire un « état des lieux »

Dans cette même « boîte à outils », nous aurons pris soin de placer un analyseur d'harmoniques. Ce dernier est indispensable pour quantifier la pollution en divers points d'une installation existante.

Identifier et caractériser les pollueurs

Il est indispensable d'identifier le (ou les) pollueur(s) majoritaire(s), ainsi que leurs spectres respectifs. Ces derniers peuvent être obtenus par mesures, ou bien par lecture des spécifications techniques fournies par chaque constructeur.

Définir l'objectif de la dépollution

Le deuxième pré-requis est relatif à l'objectif même de l'action envisagée : qu'il s'agisse de remédier à des dysfonctionnements constatés,

ou de se mettre en conformité avec les prescriptions d'un distributeur, ou encore d'un constructeur de récepteur non linéaire, la démarche diffère notablement. Cette réflexion doit également intégrer les évolutions du réseau à court terme.

Par exemple, cette étape doit permettre d'identifier (a minima) :

- le type de compensation (globale ou locale),
- le niveau de puissance, au noeud considéré,
- le type de correction souhaitée (sur les distorsions de tension et/ou de courant),
- le besoin de compensation de l'énergie réactive,

Ces deux analyses étant faites, il reste alors à choisir quelle solution présente le meilleur optimum technico-économique : il existe souvent plusieurs alternatives techniques pour un même objectif, et le problème est le plus souvent de choisir en fonction des contraintes, chaque installation électrique étant un cas particulier. Par exemple, l'ilotage ou le découplage par impédance des charges perturbatrices est une action simple sur une installation nouvelle, dès lors qu'elle est envisagée en phase d'études. Sur un réseau déjà existant, elle génère souvent des contraintes inacceptables.

Il est donc clair que le choix d'une solution « active » (quelle qu'elle soit) ne peut être fait a priori, mais qu'il est le résultat d'une démarche analytique dans laquelle le coût du seul compensateur n'est pas forcément un facteur prépondérant.

Les compensateurs actifs ont de sérieux avantages vis à vis des filtres passifs. Mais il n'y a pas nécessairement concurrence notamment pour les installations existantes déjà équipées de filtres passifs. L'insertion, après étude, d'un compensateur actif série ou parallèle est une bonne solution.

Nous allons maintenant traiter, en profitant de l'expérience accumulée sur site, de la mise en œuvre d'un compensateur actif « shunt », solution la plus simple.

4.2 Le point d'insertion d'un compensateur shunt

Le principe de raccordement d'un compensateur actif « shunt » est représenté par la **figure 37**.

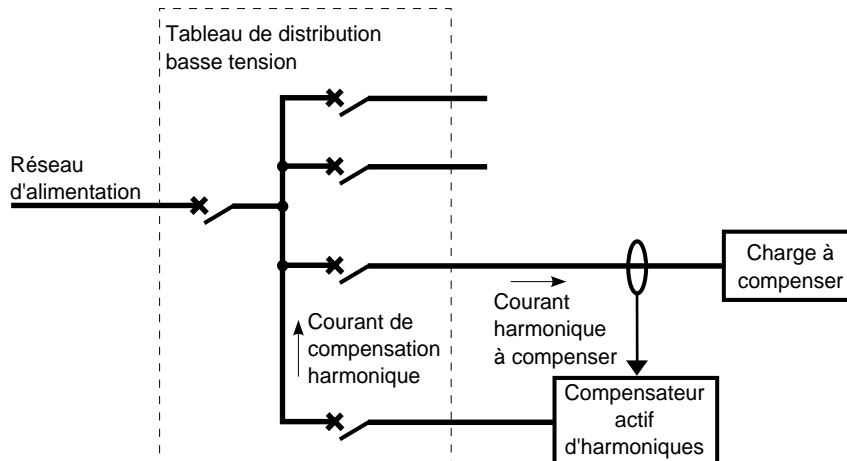


Fig. 37 : Raccordement d'un compensateur actif « shunt » - principe.

Son insertion en mode parallèle est ici réalisée au tableau basse tension d'une installation (TBT), et la seule interaction avec le réseau à dépolluer est l'insertion des capteurs de courant. En ce qui concerne l'insertion du compensateur actif, la dépollution peut être envisagée à chaque niveau de l'arborescence que traduit la **figure 38**. Le mode de compensation peut être qualifié de global (position « A »), semi-global (position « B »), ou local (position « C »), selon le choix du point d'action. S'il est difficile d'énoncer des règles absolues, il est évident que si la pollution résulte de nombreux petits récepteurs, le « mode » sera plutôt global ; par contre, si elle résulte d'un gros pollueur, l'efficacité sera optimale en « mode » local.

La dépollution locale

Le compensateur actif « shunt » est raccordé directement aux bornes de la charge. Ce mode est le plus efficace, sous réserve que le nombre de charges soit limité, et que chaque charge ait une puissance significative par rapport à la puissance globale. En d'autres termes, il est impératif que les charges traitées soient les contributeurs majoritaires aux perturbations harmoniques.

La circulation des courants harmoniques dans le réseau est évitée, ce qui réduit les pertes par effet Joule dans les câbles et composants en amont (non sur-dimensionnements des câbles et transformateurs), et par ailleurs supprime les perturbations par les charges polluées et des charges susceptibles.

Il faut toutefois noter que le compensateur actif « shunt » entraîne un abaissement de l'impédance de source au point de raccordement, et par là même un léger accroissement du taux de

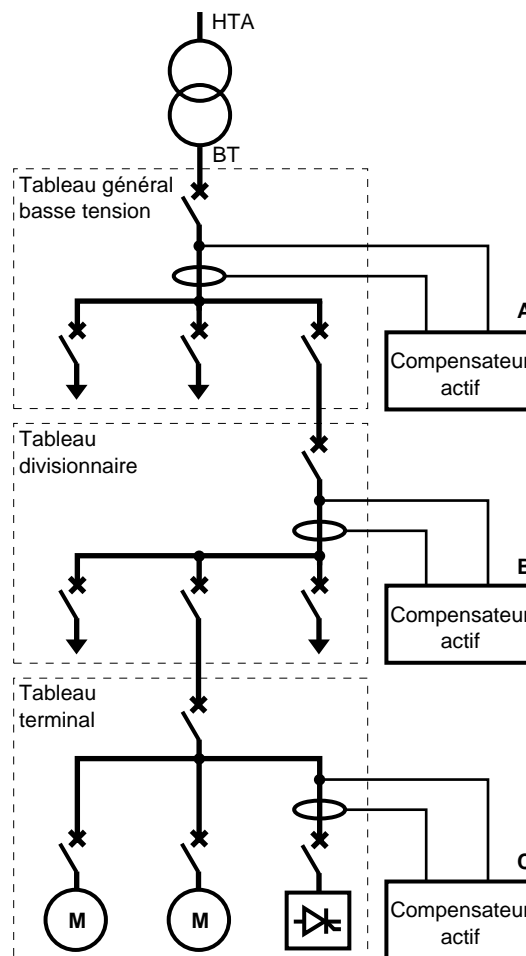


Fig. 38 : Les différents points d'insertion d'un compensateur actif « shunt » - principe.

distorsion du courant entre le point de raccordement et la charge.

La compensation semi-globale

Raccordé sur l'entrée du tableau divisionnaire BT, le compensateur actif traite plusieurs groupes de charges. Les courants harmoniques circulent alors entre le TDBT et les charges de chaque départ.

Cette forme de compensation est bien adaptée dans le cas de charges perturbatrices multiples de puissance unitaire faible. C'est le cas par exemple au niveau d'un étage d'un immeuble tertiaire (bureautique et éclairage).

Elle permet également de bénéficier du foisonnement entre charges, au prix d'un léger accroissement des pertes par effet Joule sur chaque départ traité.

Nota : ce type de compensation peut également être appliqué à un seul départ, limitant alors la

dépollution à un seul type de charges (cf. **fig. 37**).

La compensation globale

Cette forme de compensation participe plus à la mise en conformité au point de raccordement (ou de livraison) vis-à-vis de prescriptions « distributeur », qu'à la réduction des perturbations internes au réseau du client. Seul le transformateur (ou les transformateurs) bénéficie (nt) en fait directement de la dépollution ; cette forme présente néanmoins un intérêt fort dans le cas de fonctionnement en mode production autonome, du fait des interactions multiples entre charges perturbatrices et groupes générateurs à forte impédance harmonique.

Cependant, et comparativement à la compensation locale, ce mode de dépollution entraîne un dimensionnement en puissance du compensateur qui bénéficie du foisonnement des charges polluantes de l'ensemble du réseau.

4.3 Le dimensionnement d'un compensateur actif « shunt »

Le principal facteur dimensionnant du compensateur actif « shunt » est sa puissance (ou plus précisément son **courant efficace**) : le courant efficace $I_{CA\ RMS}$ est le courant que le compensateur est à même de générer de manière permanente.

Autres facteurs caractéristiques du compensateur sa **bande passante** et sa **capacité dynamique**

■ La bande passante du compensateur est définie par n_{min} et n_{max} , rangs (minimum et maximum) d'action du compensateur actif.

On a ainsi : $I_{CA\ RMS}(A) = \sqrt{\sum_{n=n_{min}}^{n=n_{max}} (I_{CA(n)}^2)}$.

■ La capacité dynamique de suivi en courant du

compensateur actif (que traduit le $\frac{di}{dt}$) est la capacité du compensateur à « suivre » des consignes rapidement variables.

NB : ces deux derniers facteurs ne sont pas considérés comme dimensionnants, dans la mesure où ils constituent une caractéristique intrinsèque du compensateur, et non un paramètre réglable.

Choix du calibre nominal :

Dès lors que le spectre du courant à dépolluer I_{CH} est connu, il est possible de déterminer le courant nominal du compensateur actif $I_{N\ CA\ RMS}$, tel que :

$$I_{N\ CA\ RMS}(A) \geq \sqrt{\sum_{n=n_{min}}^{n=n_{max}} I_{CH(n)}^2}$$

Sous réserve que la condition ci-dessus soit respectée, il est alors possible de calculer le « nouveau » taux de distorsion en courant

(amont) après mise en service du compensateur :

$$TDH\ I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=n_{min}} I_{CH(n)}^2 + \sum_{n=n_{max}+1}^{n \rightarrow \infty} I_{CH(n)}^2}}{I_{CH(1)}}$$

Cette formule permet d'apprécier si la performance théorique maximale du compensateur est compatible avec l'objectif fixé. Elle peut encore être simplifiée, si l'on considère le cas particulier des produits Merlin Gerin, pour lesquels $n_{min} = 2$ et $n_{max} = 23$:

$$TDH\ I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=24}^{n \rightarrow \infty} I_{CH(n)}^2}}{I_{CH(1)}}$$

De plus, la règle de choix du calibre nominal énoncée ci-dessus doit être pondérée par les faits pratiques suivants :

- le spectre harmonique de la plupart des charges n'est significatif que dans la seule bande, h3 à h13,
- l'objectif de l'insertion du compensateur actif n'est pas d'annuler le TDH (I), mais de le minimiser pour qu'il soit par exemple inférieur à 8 %,
- un compensateur actif peut être choisi d'un calibre inférieur à $I_{N\ CA\ RMS}$, et fonctionner alors en saturation permanente (par limitation permanente et automatique de son courant efficace).

Enfin, la mise en parallèle au même point d'insertion de plusieurs compensateurs actifs est techniquement possible, et cette solution peut s'avérer intéressante en cas d'évolution d'un réseau déjà équipé !

4.4 Exemples d'application

Réduction des distorsions liées aux canalisations

Dans le cadre des IGH (Immeubles de Grande Hauteur) ou des bâtiments à fort développement horizontal, le problème principal est lié aux longueurs des canalisations entre le point de livraison (transformateur HTA/BT) et les charges.

En effet, quelle que soit la qualité de l'onde de tension à l'origine de l'installation, et quelles que soient les précautions prises au niveau des canalisations (choix de la section des câbles, fractionnement,...), la distorsion harmonique de tension va croissant avec l'« altitude » ou la distance !

Il existe donc un point à partir duquel la distorsion de tension peut être considérée comme non-admissible en mode permanent, et le compensateur actif « shunt » constitue une alternative intéressante aux solutions traditionnelles (ex : îlotage par transformateurs BT/BT à couplage judicieux).

A titre d'exemple, considérons le cas d'une ASI triphasée alimentant un groupe de charges « informatiques » à l'extrémité d'une ligne de 60 m. Nous constatons alors au niveau de la charge une distorsion en tension de 10,44 % (entre phases), et 15,84 % (entre phase et neutre). Cette dégradation a deux origines combinées :

- la sensibilité de l'ASI (à régulation non MLI) à la caractéristique non-linéaire du courant aval,
- la caractéristique majoritairement selfique de la ligne, qui amplifie les distorsions.

La solution proposée est représentée **figure 39**. Elle repose sur l'insertion d'un compensateur actif « shunt » au plus près des charges.

Les performances sont alors tout à satisfaisantes par rapport à l'objectif : le TDH (U) tombe à 4,9 % entre phases et à 7,2 % entre phase et neutre.

Association Compensateur actif. « shunt » et composants passifs - Impact tarifaire

Une station de pompage permet d'assurer une pression d'eau constante sur le réseau de distribution d'eau potable (cf. **fig. 40**). Pour ce faire, la motopompe P1 est commandée par un variateur de vitesse à convertisseur de fréquence.

Dans ce cas particulier, l'objectif principal était la mise en conformité du spectre du courant source vis-à-vis de prescriptions du distributeur. Sans dispositif de filtrage, le niveau d'émission harmonique autorisé était :

- largement dépassé sur le rang 5,
- pratiquement atteint sur les rangs 7 et 11.

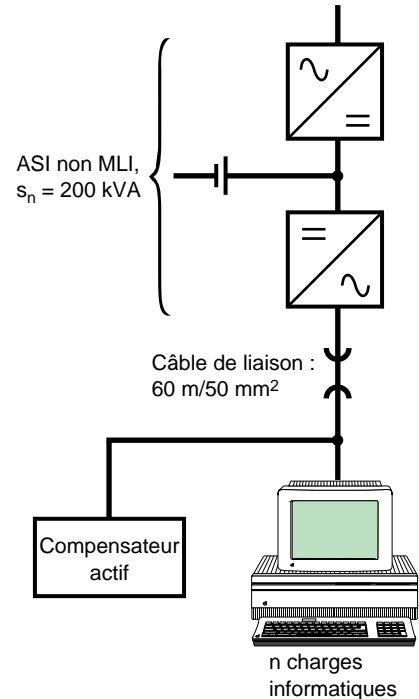


Fig. 39 : Traitement par compensateur actif de la distorsion de tension à l'extrémité d'un câble de 60 m.

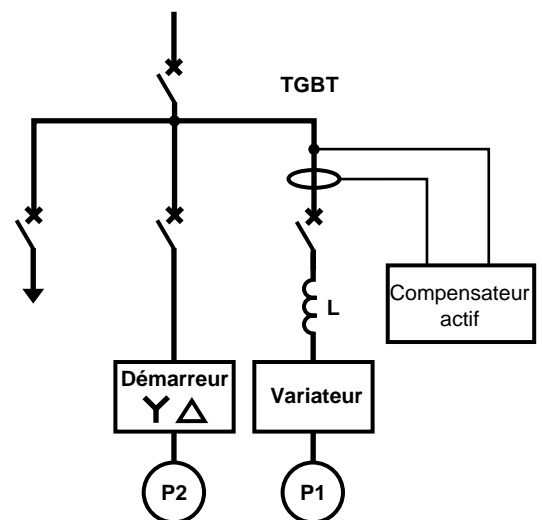


Fig. 40 : Station de pompage - schéma.

Le choix adopté est la combinaison de selfs en ligne et d'un compensateur actif « shunt » ; la **figure 41** traduit les performances mesurées :

- tous les rangs harmoniques sont très en-deçà des limites d'émission autorisées,
- le taux global de distorsion en courant est réduit de 89 %.

Un avantage particulièrement apprécié par le client est la réduction de sa puissance souscrite (en kVA - tarif jaune).

Cet exemple démontre en sus que l'association compensateur actif + inductance de lissage est particulièrement pertinente, étant donné le fort niveau de pollution.

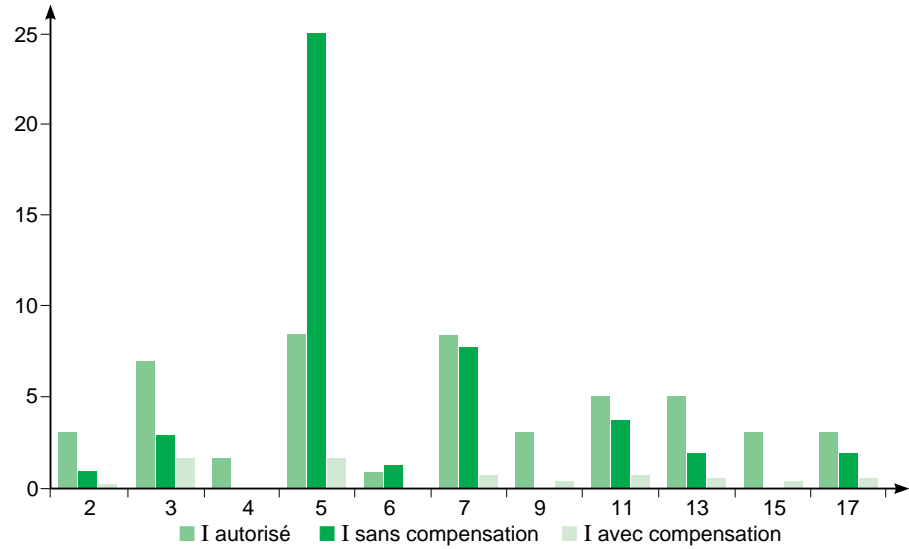


Fig. 41 : Station de pompage - représentation spectrale des courants harmoniques.

5 Conclusion

Du fait de la profusion des charges non-linéaires, la distorsion harmonique des réseaux est un phénomène dont l'amplitude est croissante. Ses effets ne peuvent être négligés, car la quasi-totalité des composants du réseau en est en pratique affectée.

La solution la plus couramment mise en œuvre jusqu'à ce jour a été le filtrage passif. A cette solution lourde et non exempte de risque, il est aujourd'hui proposé une alternative fort séduisante : l'utilisation de compensateurs actifs. Ces dispositifs utilisent une structure de type convertisseur statique de puissance. Ainsi, grâce

aux progrès des semi-conducteurs, les convertisseurs, qui sont habituellement des pollueurs harmoniques, sont capables d'être des dépollueurs efficaces et auto-adaptatifs.

Le compensateur actif « shunt », souple d'emploi, auto-adaptatif et qui ne nécessite pratiquement pas d'études préalables à la mise en service, est la solution pour la dépollution au niveau d'une charge non linéaire ou d'un tableau de distribution BT.

Il faut noter qu'il ne s'oppose pas nécessairement aux filtres passifs auxquels il peut s'associer avec intérêt.

Annexe : rappel sur les phénomènes harmoniques

Définition et grandeurs caractéristiques

Joseph FOURIER a démontré que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée par une somme de termes sinusoïdaux dont le premier, à la fréquence de répétition de la fonction, est appelé fondamental, et les autres à des fréquences multiples du fondamental appelés **harmoniques**.

A ces termes purement sinusoïdaux peut se rajouter une éventuelle composante continue.

Formule de FOURIER

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

Y_0 : valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle par la suite,

Y_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n ,
 ω : pulsation de la fréquence du fondamental,
 φ_n : déphasage de la composante harmonique de rang n .

Cette notion d'harmonique s'applique à l'ensemble des phénomènes périodiques quelle que soit leur nature, en particulier au courant alternatif.

Valeur efficace d'une grandeur alternative non sinusoïdale

Il y a identité entre l'expression usuelle de cette valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle de la grandeur alternative ($y(t)$) et l'expression calculée à partir de son contenu harmonique :

$$Y_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}.$$

Notons qu'en présence d'harmoniques, les appareils de mesure doivent avoir une bande passante élevée (> 1 kHz).

Taux de distorsion

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$\text{TDH}(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1}.$$

Il existe aussi une autre définition qui remplace le fondamental Y_1 par la valeur efficace totale Y_{eff} . Certains appareils de mesure l'utilisent.

Taux individuel d'harmonique

Cette grandeur représente le rapport de la valeur efficace d'un harmonique par rapport à la valeur efficace du fondamental (Y_1), selon la définition usuelle ou bien par rapport à la valeur efficace de la grandeur alternative (Y_{eff}).

$$H_n(\%) = 100 \frac{Y_n}{Y_1}$$

Spectre (de fréquence)

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental.

Facteur de puissance et $\cos \varphi_1$

Il est important en présence d'harmoniques de ne pas confondre ces deux termes qui sont égaux seulement lorsque les courants et tensions sont parfaitement sinusoïdaux.

■ Le facteur de puissance (λ) est le rapport entre les puissances active P et apparente S :

$$\lambda = \frac{P}{S}.$$

■ Le facteur de déphasage ($\cos \varphi_1$) concerne les grandeurs fondamentales donc :

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}.$$

En sinusoïdal pur :

$$\cos \varphi_1 = \cos \varphi = \lambda.$$

Facteur de déformation

Selon la CEI 146-1-1, c'est le rapport entre le

$$\text{facteur de puissance et le } \cos \varphi_1 : v = \frac{\lambda}{\cos \varphi_1}.$$

Il est toujours inférieur ou égal à 1.

Facteur de crête

C'est le rapport de la valeur de crête à la valeur efficace d'une grandeur périodique.

$$F_C = \frac{Y_{\text{cr}}}{Y_{\text{eff}}}.$$

Origine et transmission

Charges linéaires et non linéaires

Une charge est dite linéaire lorsqu'il y a une relation linéaire (équation différentielle linéaire à coefficients constants) entre le courant et la tension. Plus simplement, une charge linéaire absorbe un courant sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale, ce courant pouvant être déphasé d'un angle ϕ par rapport à la tension.

Lorsque cette relation linéaire n'est pas vérifiée la charge est qualifiée de non linéaire. Celle-ci absorbe un courant non sinusoïdal, donc des courants harmoniques, même lorsqu'elle est alimentée par une tension parfaitement sinusoïdale (cf. fig. 42).

Distorsion de tension et distorsion de courant

Un récepteur non linéaire provoque des chutes de tension harmoniques dans les circuits qui

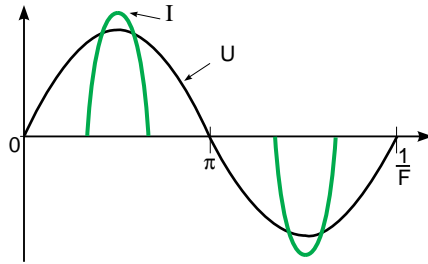


Fig. 42 : Courant absorbé par une charge non linéaire.

l'alimentent. En fait ce sont toutes les impédances amont qui sont à prendre en compte, ceci jusqu'à la source de tension sinusoïdale. En conséquence, un récepteur qui absorbe des courants harmoniques a toujours une tension non sinusoïdale à ses bornes. Ceci est caractérisé par le taux global de distorsion en tension :

$$\text{TDH}(\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} (Z_n I_n)^2}}{U_1}$$

où Z_n est l'impédance totale de source à la fréquence de l'harmonique n et I_n la valeur efficace de l'harmonique n .

La distorsion de la tension est d'autant plus importante que la charge est « déformante » et absorbe des courants harmoniques de rang élevé (impédance de source inductive $2\pi f_1 n L$). Rappelons que le taux global de distorsion du courant est :

$$100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} I_n^2}}{I_1}$$

Afin de hiérarchiser le comportement des principales sources, la figure 43 montre l'évolution de leurs impédances en fonction de la fréquence. Pour plus de détails, le lecteur intéressé voudra bien se reporter au Cahier Technique n° 159. Rappelons que les câbles de forte section sont à prédominance selfique et que les câbles de faible section ont une résistance non négligeable.

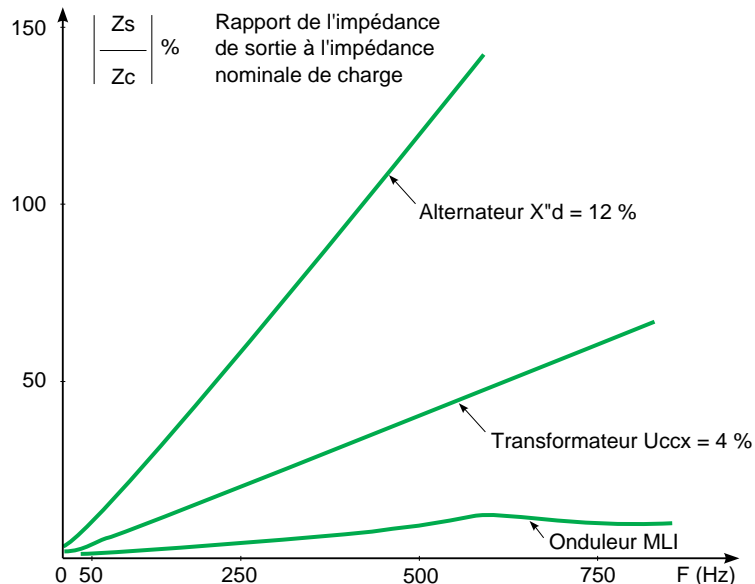


Fig. 43 : Impédance de sortie des différentes sources en fonction de la fréquence.

Les charges déformantes

La plupart des charges déformantes sont des convertisseurs statiques.

Ils peuvent être puissants et peu nombreux ou peu puissants et nombreux, citons :

- les lampes fluorescentes, les gradateurs de lumière,
- les ordinateurs,
- les appareils électroménagers (téléviseurs, micro-onde, plaques à induction).

Aujourd'hui c'est la prolifération des appareils de faibles puissances qui est la principale responsable de l'augmentation de la distorsion de tension dans les réseaux.

A titre d'illustration, la **figure 44** montre le courant absorbé par quelques charges ; et la **figure 45**, les spectres harmoniques correspondants (valeurs typiques).

Les effets néfastes des harmoniques

Effets sur les appareils et systèmes courant faible

La distorsion harmonique peut entraîner :

- des dysfonctionnements de certains appareils qui utilisent la tension comme référence pour générer des commandes de semi-conducteurs ou comme base de temps pour synchroniser certains systèmes ;
- des perturbations en créant des champs électromagnétiques. Ainsi lorsque des conducteurs « courant faible » circulent au voisinage de conducteurs de puissance traversés par des courants harmoniques, ils peuvent être le siège de courants induits capables de provoquer des dysfonctionnements des matériels auxquels ils sont raccordés ;
- enfin la circulation de courants harmoniques dans le neutre entraîne une chute de tension dans ce conducteur ; ainsi dans le cas du schéma de mise à la terre du neutre TNC les masses des différents équipements ne sont plus au même potentiel ce qui est de nature à perturber les échanges d'informations entre récepteurs « intelligents ».

De plus il y a circulation de courant dans les structures métalliques du bâtiment et donc création de champs électromagnétiques perturbateurs.

Effets sur les condensateurs

L'impédance des condensateurs diminue lorsque la fréquence augmente. De ce fait si la tension est déformée, des courants harmoniques relativement importants circulent dans ces condensateurs destinés à améliorer le $\cos \phi$. Par ailleurs la présence d'inductances dans les différentes parties de l'installation fait apparaître des risques de résonance avec les condensateurs, ce qui peut augmenter fortement l'amplitude d'un harmonique dans les condensateurs.

En pratique il faut veiller à ne jamais connecter des condensateurs sur des installations présentant un taux de distorsion en tension supérieur à 8%.

Effets sur les transformateurs

Les harmoniques génèrent des pertes supplémentaires dans les transformateurs :

- pertes par effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau,
- pertes par hystérésis et courant de Foucault dans les circuits magnétiques.

Pour tenir compte de ces différentes pertes une formule empirique normalisée (NFC 52-114) permet de calculer le coefficient de déclassement k à appliquer à un transformateur.

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{n=2}^{n=\infty} H_n^2 n^{1,6}}} \text{ avec } H_n = \frac{I_n}{I_1}$$

Par exemple avec

$H_5 = 25 \%$; $H_7 = 14 \%$; $H_{11} = 9 \%$; $H_{13} = 8 \%$, le facteur k est de 0,91.

Effet sur les alternateurs

Comme pour un transformateur, les harmoniques créent des pertes supplémentaires dans les enroulements et le circuit magnétique. De plus les harmoniques créent des couples pulsatoires qui entraînent des vibrations et des échauffements additionnels des amortisseurs. Enfin la réactance subtransitoire étant relativement importante, le taux de distorsion en tension devient très rapidement élevé dès que les courants harmoniques augmentent.

En pratique il est admis de limiter le taux de distorsion en courant à une valeur inférieure à 20% avec une limite de 5% pour chaque rang d'harmonique.

Au delà de ces valeurs il faut consulter les constructeurs avec le spectre du courant réel absorbé par les charges.

Effet sur les câbles et en particulier le conducteur de neutre

Les courants harmoniques créent des pertes supplémentaires dans les conducteurs accentuées par l'effet de peau.

Plus grave lorsque des charges monophasées absorbent des courants harmoniques 3 et multiples de 3, ces courants se retrouvent en phase et s'additionnent dans le conducteur de neutre.

Avec par exemple 75% d'harmonique 3, le courant circulant dans le neutre vaut 2,25 fois le fondamental. Le courant dans chacune des phases vaut seulement

$$\sqrt{1 + 0,75^2} = 1,25 \text{ fois le fondamental.}$$

Une attention particulière doit donc être apportée au dimensionnement du conducteur neutre en présence de charges déformantes. Le régime du neutre TN-C est fortement déconseillé.

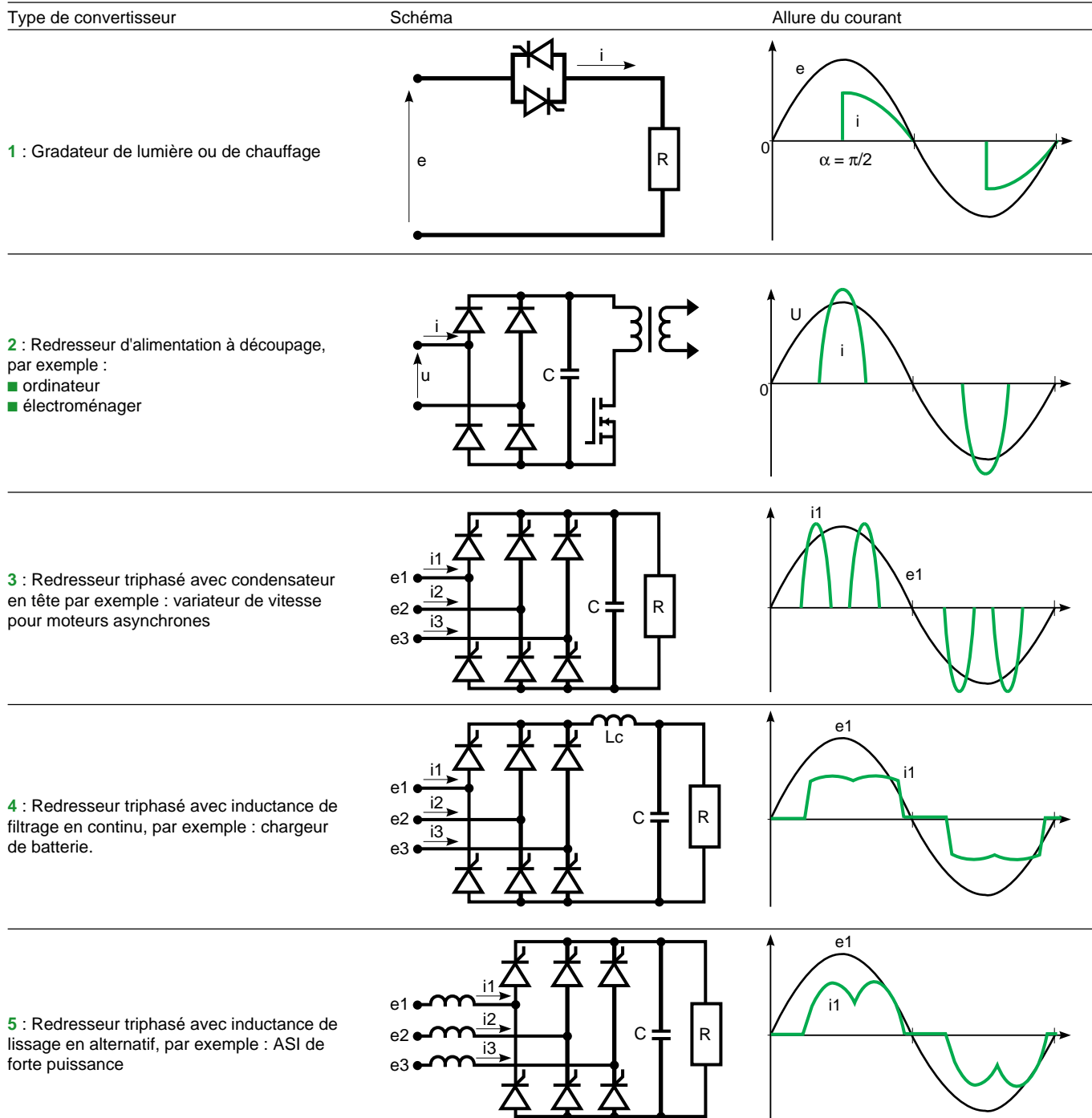


Fig. 44 : Forme du courant absorbé par quelques charges non linéaires.

N°	H ₃	H ₅	H ₇	H ₉	H ₁₁	H ₁₃	H ₁₅	H ₁₇	H ₁₉
1	54	18	18	11	11	8	8	6	6
2	75	45	15	7	6	3	3	3	2
3	0	80	75	0	40	35	0	10	5
4	0	25	7	0	9	4	0	5	3
5	0	33	3	0	7	2	0	3	2

Fig. 45 : Exemple de spectre harmonique des courants absorbés par les charges de la figure 44.

Les normes et recommandations

L'électricité est considérée comme un produit, et tout particulièrement en Europe avec la directive du 25 Juillet 1985. La norme EN 50160 définit des caractéristiques principales au point de livraison du client pour un réseau public basse tension, et en particulier les niveaux de tensions harmoniques (ceux de la classe 2 du tableau de la **figure 47**). Il s'agit de niveaux de compatibilité en terme de compatibilité électromagnétique (cf. **fig. 46**). Outre cette norme européenne, les niveaux maxi des divers rangs harmoniques sont définis par la CEI 61000.

■ **Pour les réseaux publics à basse tension** : CEI 61000-2-2 et recommandations CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques).

■ **Pour les réseaux publics moyenne et haute tension** : projet de norme CEI pour la moyenne tension et recommandations de la CIGRE.

■ **Pour les installations industrielles basse tension et moyenne tension** : CEI 61000-2-4. A titre d'illustration le tableau extrait de cette norme indique les niveaux de compatibilité harmonique dans trois situations types (classes) (cf. **fig. 47**).

Afin d'éviter d'atteindre ces niveaux il faut **fixer des limites aux perturbations émises (niveau**

d'émission) par les appareils pris isolément, ou bien pour un ensemble de matériels vis à vis de leur point de raccordement au réseau électrique. En basse tension et pour les appareils absorbant un **courant inférieur à 16 A il existe la CEI 61000-3-2** et, pour les appareils absorbant un **courant supérieur à 16 A**, le projet de guide **CEI 61000-3-4**.

Pour les applications industrielles il n'y a pas de norme mais une sorte de consensus autour de la notion d'étapes pour l'autorisation de raccordement au réseau public : l'étape 1 étant l'acceptation automatique pour de faibles puissances vis à vis de la puissance souscrite, l'étape 2 étant l'acceptation sous réserve (de ne pas dépasser pour un utilisateur seul des niveaux de l'ordre de la moitié des niveaux de compatibilité), et l'étape 3 l'acceptation à titre exceptionnel et précaire lorsque le niveau précédent est dépassé. Enfin, pour garantir un bon fonctionnement des appareils il est nécessaire que ceux-ci puissent supporter des **niveaux de perturbation supérieurs aux niveaux de compatibilité** indiqués dans la figure 47 dans le cas où ceux-ci seraient dépassés, ce qui est admis de façon transitoire ; c'est leur niveau d'immunité.

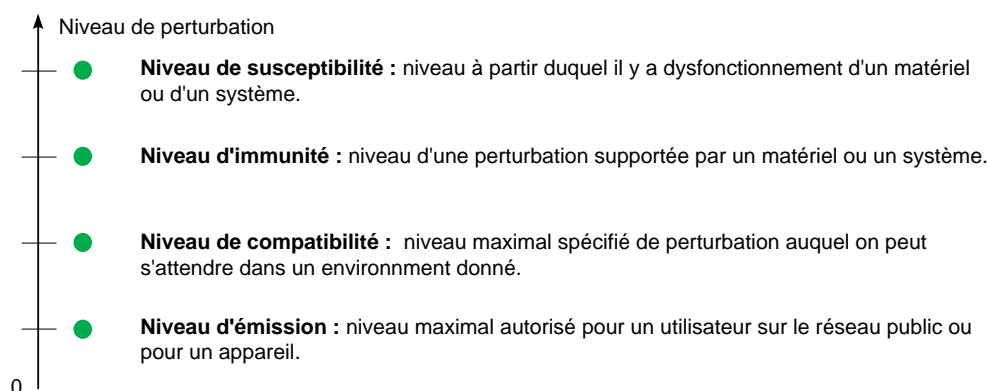


Fig. 46 : Les différents niveaux de perturbation pour une cohabitation pollueurs-pollués.

Rang de l'harmonique	Classe 1 (matériels et systèmes sensibles)	Classe 2 (réseaux publics et industriels)	Classe 3 (pour le raccordement des gros pollueurs)
2	2	2	3
3	3	5	6
4	1	1	1,5
5	3	6	8
6	0,5	0,5	1
7	3	5	7
8	0,5	0,5	1
9	1,5	1,5	2,5
10	0,5	0,5	1
11	3	3,5	5
12	0,2	0,2	1
13	3	3	4,5
TDH	5%	8%	10%

Fig. 47 : Taux (en %) des tensions harmoniques acceptables (compatibilité).

Schneider Electric

Direction Scientifique et Technique,
Service Communication Technique
F-38050 Grenoble cedex 9
Télécopie : (33) 04 76 57 98 60

Réalisation : Sodipe (26) + AK(SE)
Impression : Imprimerie du Pont de Claix - Claix - France - 1500
- 100 FF-