



(3.1.2) Condensateurs en environnement riche en harmoniques

Stefan Fassbinder, Deutsches Kupferinstitut

Juillet 2004

1	<i>Un vieil équipement dans un nouvel environnement.....</i>	3
2	<i>Bases: caractéristiques des inductances et des capacités.....</i>	3
3	<i>Quelle est la particularité d'une onde sinusoïdale ?.....</i>	5
4	<i>Qu'est-ce que la puissance réactive ?.....</i>	6
5	<i>Pourquoi compenser ?.....</i>	7
6	<i>Comment compenser dans les conditions actuelles.....</i>	8
6.1	Contrôle et régulation de la puissance réactive.....	8
6.2	Centralisée ou répartie ?	10
6.3	Désaccord d'un circuit (detuning)	12
7	<i>En résumé.....</i>	15
8	<i>Références et Bibliographie.....</i>	15

European Copper Institute



L'European Copper Institute est une joint venture Européenne entre les principaux producteurs de cuivre mondiaux et les fabricants Européens de demi-produits. Créé en 1996, l'ECI assure la promotion du cuivre en Europe avec un réseau de 11 centres de développement basés en Allemagne, au Benelux, en Espagne, en France, en Grèce, en Hongrie, en Italie, en Pologne, au Royaume Uni, en Scandinavie et en Russie. L'ECI poursuit les efforts initialement engagés par le Copper Products Development Association, créé en 1959, et de l'INCRA (International Copper Research Association) créé en 1961.

Centre d'Information du Cuivre, Laiton & Alliages et Copper benelux



Ce sont les organisations professionnelles des producteurs et des transformateurs de cuivre chargées de promouvoir les applications du cuivre et de ses alliages sur les marchés français et du Benelux. Financés par les producteurs de cuivre du monde entier et par les sociétés fabricants de demi-produits, le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux mettent en oeuvre des programmes de développement sur leurs marchés respectifs en coordination avec les structures professionnelles internationales de leurs mandants : International Copper Association au niveau mondial, European Copper Institute au niveau Européen. Ils ont pour vocation de produire et de diffuser l'information technique relative au cuivre et à ses alliages, de faire connaître les meilleures méthodes de mise en oeuvre des produits dans chacun de leur domaine d'emploi et d'en promouvoir l'utilisation dans les grands secteurs d'application. Le Centre d'Information du Cuivre et Copper benelux sont les coordinateurs respectivement pour la France et le Benelux du programme européen Leonardo relatif à la formation en matière de «Power Quality».

Remerciements

Ce projet a été mis en oeuvre avec le soutien de la Communauté Européenne et l'International Copper Association Ltd.

Avertissement

Le contenu de ce projet ne reflète pas nécessairement la position de la Communauté Européenne. De même, il n'implique aucune responsabilité de la part de la Communauté Européenne. L'European Copper Institute, le Centre d'information du Cuivre et Copper benelux déclinent toutes responsabilités pour toutes conséquences directes ou indirectes ou les dommages qui pourraient résulter de l'utilisation du contenu ou de l'incapacité à utiliser les informations et les données de ce guide.

1 Un vieil équipement dans un nouvel environnement

Les batteries de condensateurs, utilisés pour la compensation de la puissance réactive fondamentale, sont essentielles pour un fonctionnement économique d'une installation comportant des charges résisto-inductives. En fait, les charges résisto-inductives sont omniprésentes depuis le début l'électrotechnique de puissance. Cependant puisque les charges non-linéaires sont maintenant devenues également omniprésentes, il y a deux nouveaux risques qui apparaissent dans le voisinage et au niveau des batteries de condensateurs :

- surcharge en courant des condensateurs,
- résonance parallèle de condensateurs et d'inductances situées à proximité au sens électrique du terme.

Les condensateurs de compensation continuent d'être indispensables et il est assez facile de les dimensionner ou de les mettre à niveau pour faire face à ces nouveaux défis. Ce Guide détermine l'approche optimale pour choisir un nouvel équipement et remplacer les batteries de condensateurs existantes afin de parer les problèmes causés par les harmoniques.

2 Bases: caractéristiques des inductances et des capacités

Electriquement, une inductance est analogue à l'inertie d'une masse dans un système mécanique. Une inductance, c'est-à-dire un composant avec une valeur inductive définie et connue, représente l'équivalent électrique d'un volant d'inertie qui a une inertie donnée. Bien entendu, tout ce qui a une masse a également une inertie et, de la même manière, chaque conducteur électrique a une inductance parasite.

Les inductances L ainsi que les capacités C sont des composants réactifs avec une réactance générant ou absorbant de l'énergie réactive, puisque la puissance réactive capacitive consommée est équivalente à la puissance réactive inductive fournie, et vice-versa. La puissance réactive n'a en effet pas de direction clairement définie de circulation. Les réactances sont calculées de la manière suivante :

$$X_L = 2\pi fL \text{ et } X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

Ainsi, la réactance inductive X_L est proportionnelle à la fréquence f , tandis que la réactance capacitive X_C est inversement proportionnelle à la fréquence f . Pour n'importe quelle association parallèle de L et de C, il existe une fréquence f_0 pour laquelle les réactances sont égales, appelée fréquence de résonance. Cette fréquence, pour laquelle l'association LC oscille, se calcule comme suit :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Dans le cas où les courants sont en avance, il est difficile d'imaginer comment un courant capacitif peut être assez "intelligent" pour savoir à l'avance que la tension qui l'engendre sera en quadrature retard mais, d'une certaine façon, c'est quand même le cas. Pour être

précis, c'est la variation de courant qui suit ou qui précède la variation de tension correspondante, à savoir son passage à zéro. Cela est dû à l'énergie stockée dans le condensateur et des caractéristiques particulières de l'onde.

La capacité électrique correspond à l'élasticité d'un composant mécanique. Un condensateur peut être fabriqué avec une capacité définie, correspondant à la souplesse d'un système mécanique, mais, de la même façon que les matériaux sont élastiques jusqu'à un certain point, il y a une capacité parasite entre deux pièces quelconques de matériaux conducteurs.

Il s'agit de savoir si ces réactances parasites sont assez importantes pour jouer un rôle d'un point de vue pratique. C'est fréquemment le cas en haute tension ou à hautes fréquences, mais pas nécessairement en basse tension et à fréquence industrielle.

L'énergie contenue dans chacun des deux systèmes de stockage d'énergie est donnée par :

$$W_{spring} = \frac{D}{2} * s^2, \quad W_{mass} = \frac{m}{2} * v^2$$

où :

D = constante d'élasticité (allongement par force, loi de Hooke)

s = allongement (distance instantanée de la position par rapport à la position au repos)

m = masse

v = vitesse du mouvement de cette masse

Dans lesquelles s et v peuvent être, et doivent être, exprimés en fonction du temps $s(t)$ et $v(t)$, car ce sont des grandeurs instantanées, variables périodiquement en fonction du temps.

En combinant maintenant ces deux équations, l'inertie et l'élasticité, on s'intéresse à deux systèmes de stockage d'énergie. L'énergie qui est fournie par l'un des composant va être transférée directement vers l'autre. Si le ressort est tendu puis libéré, la masse va accélérer, en fonction de la force de rappel du ressort. Au passage à zéro de la force, le ressort est dans son état de repos et la masse se déplace à sa vitesse maximale. Puisque la masse est inertielle, elle continue de se déplacer, comprimant maintenant le ressort, l'énergie est alors transférée de la masse vers le ressort. Lorsque les systèmes de stockage d'énergie sont un condensateur et une inductance, la tension dans le ressort allongé ou comprimé correspond à la tension positive ou négative au borne du condensateur, et la vitesse de la masse est le courant, changeant également de polarité à intervalles réguliers. Tous les changements de polarité se produisent alternativement et à intervalles constants, la tension en premier puis le courant, chaque quart de période (ou chaque 90° puisque tous les changements des deux grandeurs, position et vitesse dans le modèle mécanique, tension et courant dans le modèle électrique, suivent une fonction sinusoïdale). En raison du déphasage de 90°, on peut également dire que l'une des grandeurs est une fonction cosinus du temps, à tout instant de l'oscillation, en supposant les composants linéaires et sans pertes.

$$\sin^2(\omega t) + \cos^2(\omega t) = 1$$

Alors l'énergie interne

$$W = \frac{C}{2} * u^2(t) + \frac{L}{2} * i^2(t) = const$$

à tout instant. Avec de vrais composants, des pertes existent et le déphasage entre le courant et la tension pour un composant inductif ou capacitif devient légèrement inférieur à $\pm 90^\circ$ mais, si le fonctionnement est dans l'échelle spécifiée, les pertes sont faibles, et l'influence de la non-linéarité du matériaux est largement négligeable d'un point de vue technique si la réactance est correctement dimensionnée.

3 Quelle est la particularité d'une onde sinusoïdale ?

Les tensions sinusoïdales engendrent des courants sinusoïdaux, et les courants sinusoïdaux sont la cause de chutes de tension sinusoïdales. Est-ce vrai uniquement pour des formes d'ondes sinusoïdales ou pour n'importe quelle autre fonction? La réponse est sans équivoque : le phénomène est caractéristique d'une onde sinusoïdale. Voir les exemples pour d'autres formes d'ondes aux figures 1 et 2. C'est uniquement pour les éléments résistifs que la valeur instantanée de la tension est proportionnelle à la valeur instantanée du courant, c'est-à-dire que n'importe quelle forme d'onde de tension génère une forme d'onde de courant identique et vice et versa. Pour des charges réactives (par exemple dans le cas d'une inductance L), la valeur de la tension instantanée est proportionnelle à la variation du courant par rapport au temps (di/dt), ou (dans le cas d'un condensateur C) le courant est proportionnel à la variation de la tension instantanée par rapport au temps (du/dt). L'onde est indifféremment sinusoïdale ou cosinusoïdale.

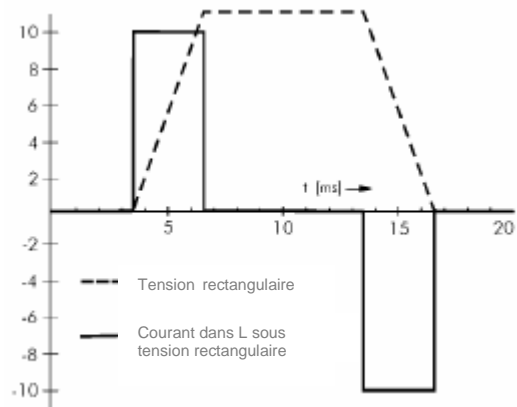


Figure 1 – une tension rectangulaire engendre un courant trapézoïdal dans le cas d'une réactance idéale (sans perte)

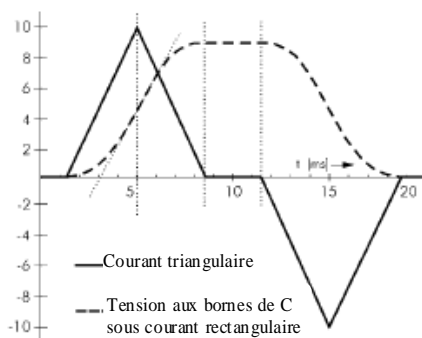


Figure 2 – Courant triangulaire circulant dans une capacité

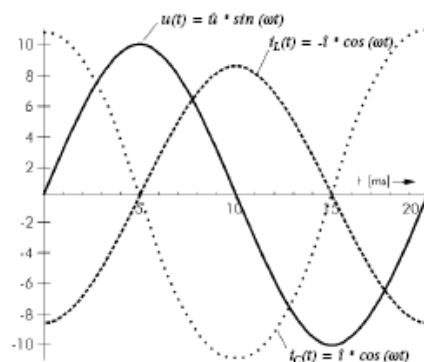


Figure 3 – une tension sinusoïdale engendre des courants réactifs cosinusoïdaux

Les courbes de tension et de courant sinusoïdales ont la même forme pour des composants résistifs et réactifs, mais avec un déphasage. Pour les composants réactifs, la tension est proportionnelle à la **variation** du courant. Mais la variation d'une sinusoïde est représentée par une cosinusoïde, qui a la même forme et simplement un point de départ différent. Puisque l'origine des tensions et des courants dans les lignes se situe dans un passé ne présentant plus d'intérêt, il en découle que les tensions sinusoïdales engendrent des courants sinusoïdaux, et les courants sinusoïdaux sont la cause de chutes de tension sinusoïdales, avec un simple déphasage entre ces formes d'onde.

4 Qu'est-ce que la puissance réactive ?

Pour une charge résistive, les valeurs instantanées de tension et de courant sont proportionnelles les unes aux autres (Figure 4), ce qui n'est pas le cas d'une charge réactive (Figure 6). Dans ce dernier cas, si l'une des grandeurs a une forme d'onde sinusoïdale, alors l'autre grandeur également, mais avec un déphasage entre les deux. Ainsi, durant deux quarts de chaque cycle, elles ont le même signe, mais durant les deux autres quarts leurs signes sont différents. Durant ces périodes d'opposition de polarité entre le courant et la tension, leur produit, la puissance, est négatif, c'est à dire qu'un consommateur devient temporairement une "source" de puissance. L'énergie électrique absorbée durant le quart de période précédent n'a pas été consommée (c'est-à-dire convertie sous une autre forme d'énergie, comme de la chaleur), mais a été stockée et est maintenant récupérée et renvoyée vers le réseau. L'énergie réelle "active" transférée durant chaque période complète est égale à l'intégrale de la puissance, qui est la surface sous la courbe de la tension multipliée par le courant (surfaces ombragées dans les figures ci-dessous), avec les parties sous l'axe des abscisses devant être soustraites aux parties du dessus. De ce fait, la puissance réactive fondamentale traduit une oscillation énergétique.

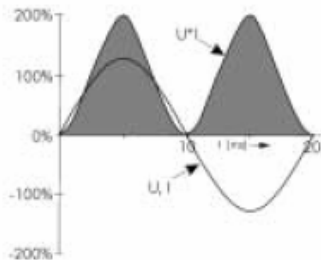


Figure 4 – Charge résistive

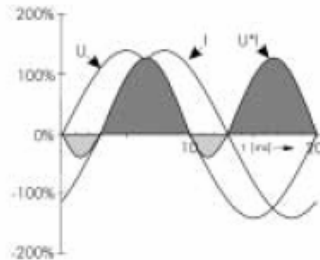


Figure 5 – Charge résistive-inductive

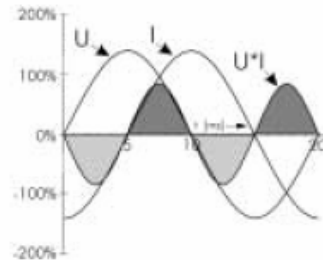


Figure 6 – Charge inductive

Ainsi, la définition de la puissance réactive, dans le cas de tensions sinusoïdales et de charges réactives, est relativement simple. Cependant, la puissance réactive est également présente pour des charges résistives à commande d'angle de phases. Dans une revue allemande d'électrotechnique, un auteur affirma qu'une telle charge (par exemple une lampe incandescente avec un gradateur) ne génère pas de puissance réactive fondamentale, puisqu'il n'y a pas de période de temps dans une onde complète où la tension et le courant ont des polarités opposées. Il provoqua un violent désaccord parmi les lecteurs, relevant que dans la transformation de Fourier du courant d'une telle commande à angle de phase, l'onde fondamentale avait un déphasage arrière par rapport à la tension, il était alors évident qu'il y avait une puissance réactive fondamentale. Ces deux points de vue semblent logiques, mais lequel est correct ?

La Figure 7 fournit l'explication. Du point de vue de la charge (rangée supérieure de la figure 7), il n'y a pas de puissance réactive, le courant est en phase avec la tension (malgré la forme d'onde distordue) et le facteur de déplacement est unitaire. Mais toutes les charges existent dans une distribution, et doivent être examinées vues de la distribution, comme le montre la rangée inférieure de la figure 7. La forme d'onde de la tension est de nouveau sinusoïdale et le facteur de déplacement est maintenant de 0,8 retard (voir les mesures W, VA et VAR).

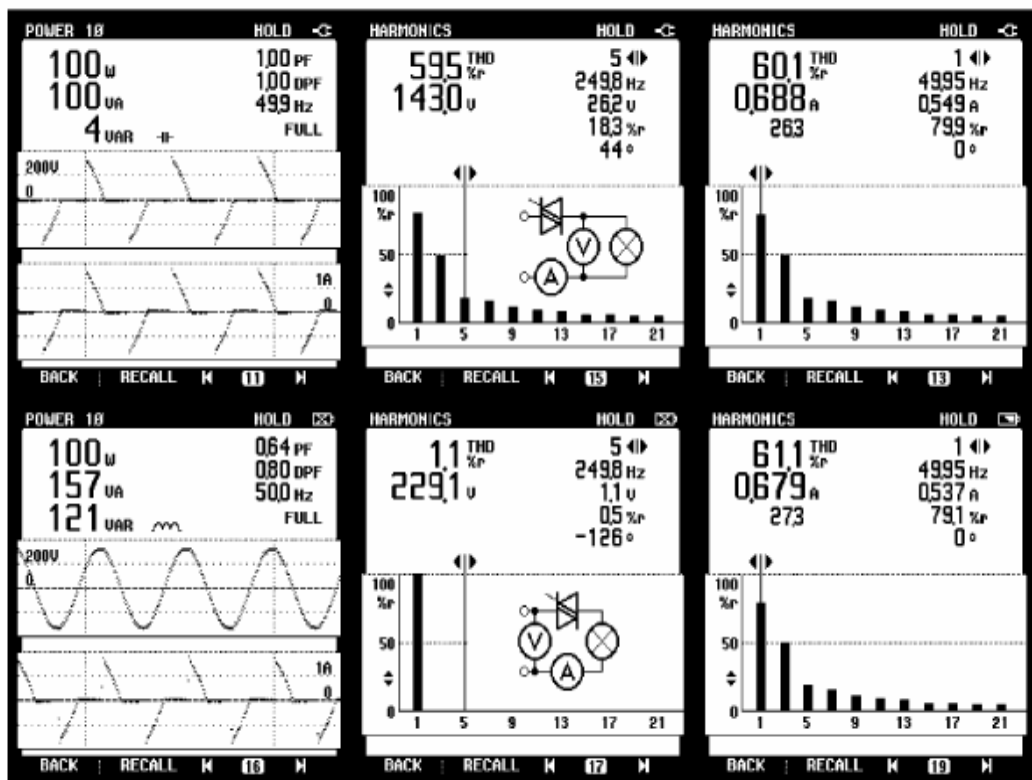


Figure 7 – Une charge résistive à angle de phase contrôlé génère-t-elle de la puissance réactive fondamentale ou pas ? Dans le cadre d'une analyse pragmatique, il y a bien un réel impact sur le réseau, bien qu'aucune oscillation énergétique ne se produise, ce que certains experts considèrent comme un pré-requis pour parler de la présence d'énergie réactive.

5 Pourquoi compenser ?

Dans un réseau normal, il y a plusieurs charges actives simultanément. Certaines sont résistives, tandis que d'autres ont un comportement capacitif, avec un courant légèrement en avance sur la tension, et d'autres encore ont un comportement inductif où le courant est en retard par rapport à la tension d'alimentation. Dans la plupart des réseaux, les charges résisto-inductives sont prédominantes donc le courant global sera de nature résisto-inductive (Figure 5). Cette oscillation continue, mais non désirée, de l'énergie engendre une circulation de courant supplémentaire dans les câbles et les transformateurs qui s'additionne à leurs charges, générant des pertes résistives supplémentaires et utilisant une part potentiellement importante de leurs possibilités. Par conséquent, les raisons principales de la mise en œuvre de la compensation sont les suivantes :

- éviter des niveaux de courants supérieurs au besoin et à la capacité des équipements installés,
- limiter les pertes énergétiques qui les accompagnent,
- réduire les chutes de tension que les courants supplémentaires engendreraient sur la distribution.

Ces chutes de tension supplémentaires sur la distribution sont importantes ; un courant réactif circulant dans une résistance est la cause de réelles pertes de puissance. Même lorsque l'impédance est largement réactive, les variations rapides du courant réactif peuvent provoquer des papillonnements (flicker). Un bon exemple est une grue de chantier raccordée à un transformateur d'une puissance relativement faible lors de la construction d'un nouveau logement dans une zone résidentielle.

Les mouvements des grues sont généralement réalisés par des moteurs asynchrones triphasés en aval de contacteurs assez fréquemment commutés d'arrêt vers marche, de lent vers rapide et de montée vers descente. Les courants de démarrage de ces moteurs sont très élevés, plusieurs fois le courant nominal, mais ces courants de démarrage ont une composante inductive très élevée, la facteur de puissance pouvant être autour de $\cos \varphi \approx 0,3$, voire même plus faible avec des plus grosses machines. La baisse de tension dans le transformateur est également fortement inductive, donc cette baisse de tension a plus ou moins le même angle de phase que le courant de démarrage du moteur et accentue significativement le flicker que le même courant consommé par une charge résistive (Figure 8). Toutefois, cela signifie

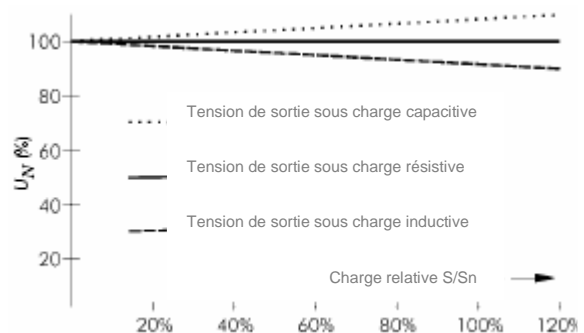


Figure 8 – La baisse de tension dans un transformateur (ici un 630 kVA selon la liste C de la HD 428) est faible pour une charge résistive, importante pour une charge inductive et négative pour une charge capacitive.

également que ce flicker peut facilement être atténué par l'ajout de condensateur pour compenser le comportement inductif du courant de démarrage du moteur.

6 Comment compenser dans les conditions actuelles

6.1 Contrôle et régulation de la puissance réactive

Il est souhaitable de compenser la puissance réactive. C'est assez facile à réaliser en ajoutant une charge capacitive appropriée en parallèle des charges résisto-inductives, le comportement inductif étant alors compensé. Ainsi, pendant que l'élément capacitif renvoie son énergie stockée dans le réseau, les éléments inductifs la consomment et vice-versa, car les courants en avance et en retard circulent en permanence dans des directions opposées.

De cette manière, le courant total est **diminué** par **l'ajout d'une charge**. Cela s'appelle de la compensation parallèle.

Réaliser ceci correctement nécessite de connaître précisément la quantité de charges inductives présentes dans l'installation, sans quoi une sur-compensation pourrait se produire. Dans ce cas, l'installation deviendrait une charge résisto-capacitive qui, dans les cas extrêmes, pourrait être plus mauvaise que sans compensation. Si la charge, et plus particulièrement sa composante inductive, varie, alors une compensation dynamique est nécessaire. Généralement cette solution est réalisée par groupement de condensateurs, en les connectant et les déconnectant par gradins via des contacteurs. Ceci, bien sur, crée des pics de courant avec l'usure conséquente des contacts, le risque de soudure des contacts et les tensions induites dans les lignes parallèles de communication. Un soin doit être apporté dans le réglage de l'enclenchement. En effet, lorsqu'une tension, au moment de sa valeur maximale, est appliquée aux bornes d'un condensateur complètement déchargé, le courant d'appel est égal à celui d'un court-circuit. Bien pire, si l'enclenchement a lieu un court instant après avoir été déconnecté, le condensateur peut être presque complètement chargé avec la polarité inverse, causant un courant d'appel à peu près deux fois plus élevé que le pic de courant de court-circuit de l'installation ! Si il y a un grand nombre de charge à alimentation à découpage (AAD) en train de fonctionner sur la même distribution, alors un condensateur de compensation chargé, reconnecté à l'alimentation, peut directement alimenter un grand nombre de condensateurs internes aux alimentations et qui sont à cet instant déchargés, de façon quasiment directe, de capacité à capacité, avec une très faible impédance entre elles. La pointe de courant résultante est extrêmement courte mais extrêmement élevée, plus que dans le cas d'un court-circuit ! Il existe de nombreux rapports concernant la défaillance des mécanismes, particulièrement les contacts des relais commandant les gradins de condensateurs, du fait de courtes interruptions sur le réseau, éliminées automatiquement, à savoir une coupure d'arc ou d'une ligne moyenne ou haute tension. Il est souvent annoncé que le doublement de cette valeur du pic ne se produit pas avec des condensateurs équipés de résistances de décharge, conformément à l'IEC 831. Toutefois, la norme impose que la tension décroisse à moins de 75 V après 3 minutes, limitant ainsi l'effet des ces résistances lors d'une courte interruption d'une durée de quelques dizaines de millisecondes à quelques secondes.

Si, au moment de la reconnexion du condensateur sur la distribution, la tension résiduelle du condensateur se trouve être égale à la tension d'alimentation, aucun pic de courant n'apparaît. Ceci est au moins vrai si le condensateur de compensation est vu comme un condensateur idéal et la tension d'alimentation comme une source parfaite de tension, c'est-à-dire avec une impédance de source nulle. Mais si le caractère inductif de l'installation est pris en considération, il est certain qu'une résonance entre l'installation et les condensateurs peut se produire. Imaginons le cas suivant : la tension résiduelle du condensateur est la moitié de la valeur crête et est égale à la valeur instantanée de la tension du réseau, ce qui pourrait être le cas 45° après le dernier passage à zéro de la tension, soit

$$u_C = u\left(\frac{\pi}{4}\right) = 400V \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 283V$$

A cet instant, le courant dans le condensateur devrait être :

$$i_C = -\frac{i}{2}$$

Mais ce n'est pas le cas car le condensateur a été déconnecté du réseau à cet instant. Au moment de la connexion, en négligeant l'inductance de l'installation, le courant atteint cette valeur immédiatement, et rien de ce qui se serait produit avant la déconnexion ne se passe.

Mais une installation réelle n'est pas sans effet inductif, et en conséquence, le courant met du temps pour s'établir puis augmente pour atteindre cette valeur et – à nouveau du fait de l'inductance et de son caractère "inertiel"- la dépasse pour arriver jusqu'au double de la valeur attendue. Puis, il redescend à nouveau et ainsi de suite, subissant une courte période d'oscillation qui tend vers zéro, le phénomène étant limité à l'intérieur de la première période réseau qui suit la connexion. La fréquence d'une telle oscillation peut être plutôt élevée, si l'inductance de l'installation est faible, et peut perturber des équipements de l'installation. C'est seulement si les valeurs instantanées de la tension du réseau et de la tension résiduelle du condensateur sont toutes les deux à leurs valeurs crêtes positives ou négatives et que, au même moment la valeur instantanée du courant est nulle, que le courant résisto-inductif démarre sans oscillation.

Plus précisément, il y a deux conditions à satisfaire. Premièrement, la somme des tensions aux bornes de la capacité et de sa réactance série (qu'elle soit parasite ou intentionnelle pour réaliser un désaccord) doit être égale à la tension du réseau. Deuxièmement, la valeur instantanée supposée du courant, en supposant que les condensateurs étaient déjà connectés depuis assez longtemps, est égale à la valeur du courant actuel qui, bien sûr, est égale à zéro jusqu'au moment de la connexion. Cette seconde condition est satisfaite uniquement lorsque la tension du réseau est à sa valeur crête qui, par conséquent, doit être égale à la tension aux bornes du condensateur. Pour parvenir à cela, le condensateur est pré-chargé depuis une source d'alimentation supplémentaire. Cette pratique a un second avantage mineur. Dans le sens où elle garantit qu'il y a toujours la quantité maximum possible d'énergie stockée dans le condensateur qui n'est pas utilisé, ce qui permet au moment de l'enclenchement de compenser les baisses rapides de tension et par la suite le flicker qui auraient pu apparaître ultérieurement.

Cependant, les contacteurs sont trop lents et ne fonctionnent pas de manière suffisamment précise pour prévoir la commutation à un point précis de l'onde. Lorsque des contacteurs sont utilisés, des mesures doivent être mises en oeuvre afin de limiter le pic du courant d'appel, comme par exemple des résistances de limitation de courant ou des réactances de désaccouplement. Cette dernière solution est fréquemment utilisée pour d'autres raisons (voir le module 3.3.1 de ce Guide) et, est parfois exigée par les distributeurs. Bien que cette réactance en série remplace un courant d'appel à la connexion par une pointe de tension lors de la déconnexion, cela est toujours moins grave, puisque le dimensionnement en puissance réactive de l'inductance n'est qu'une fraction de celle de la capacité et l'énergie disponible est donc moindre.

Les contacteurs électroniques, comme les thyristors, peuvent être facilement commandés pour être commutés de façon précise au moment opportun. Il est également possible de commander la commutation de manière à compenser un flicker rapide causé par une forte charge inductive instable, telle que le moteur de la grue mentionné précédemment, un four à arc ou une soudeuse à point.

Une alternative fréquemment utilisée dans certains pays européens est la compensation dite FC/TCR, la mise en parallèle d'un condensateur fixe avec une réactance commandée par thyristor.

6.2 Centralisée ou répartie ?

La raison pour laquelle les consommateurs d'électricité compensent l'énergie réactive est que certains distributeurs facturent cette énergie, pas aussi cher que l'énergie active, mais suffisamment pour qu'ils soient dédommagés de "l'utilisation inutile" du réseau de

distribution. Dans certains pays, cette facturation de l'énergie réactive est en baisse, et la compensation du facteur de puissance devient plus rare. Les utilisateurs de l'électricité voient cela comme un avantage, mais cela crée une charge supplémentaire sur le réseau qui de ce fait fonctionne souvent assez près de son maximum.

L'approche traditionnelle est d'installer une importante batterie statique de compensation au point de livraison, en tête d'installation, et de corriger le facteur de puissance jusqu'au niveau nécessaire pour éviter la facturation, habituellement $\cos \varphi = 0,90$ ou $\cos \varphi = 0,95$. L'approche alternative est de répartir la compensation à proximité des charges résisto-inductives et, dans les cas extrêmes, près de chaque appareil unitaire qui génère du courant réactif.

La compensation centralisée est souvent considérée comme moins chère car l'armoire centrale est moins onéreuse à acheter que le même ratio de puissance réactive dispersé dans l'installation en petites unités réparties. La capacité de compensation installée peut aussi être plus faible car on peut supposer que tout le courant réactif consommé ne le sera pas au même moment. Toutefois, il doit être rappelé que les courants réactifs génèrent de réelles pertes à l'intérieur des installations, la chute de tension dans un élément résistif, par exemple du câble, est en phase avec le courant et par conséquent le produit des deux, la puissance perdue, est toujours positive la compensation centralisée ne permet absolument pas de réduire ces pertes, elle se contente de réduire les frais perçus par le distributeur. D'un autre côté, lorsque la compensation est répartie, le coût total des unités individuelles sera supérieur au coût d'une grosse unité unique centralisée, et la capacité totale de compensation installée sera généralement plus importante, tous les équipements ayant leur compensation, qu'ils soient en service ou pas. Les pertes sont réduites car le courant réactif ne circule qu'entre le compensateur et l'équipement, plutôt que de retourner vers le compensateur centralisé en tête d'installation.

Au-delà de l'efficacité, certains arguments techniques vont dans le sens ou à l'encontre de la compensation centralisée. Par exemple, si la charge globale d'un transformateur est capacitive, la tension de sortie s'élève au dessus du nominal. Cet effet est parfois utilisé pour compenser la chute de tension sur un transformateur fortement chargé. La charge est simplement sur-compensée donc la charge totale paraît capacitive au niveau du transformateur et, réduit ainsi la chute de tension inductive dans celui-ci [1]. Dans le cas où de fréquentes commutations de charges importantes créent un problème de flicker, cela peut être une solution plus robuste et plus fiable que des compensateurs électroniques de flicker et pourrait être également plus rentable en termes de coûts dans le cas où une compensation est nécessaire en permanence.

Cependant, dans le cas général, la mise en surtension d'un transformateur par une charge capacitive est un risque qui doit être évité ou qui doit être traité convenablement, par exemple en choisissant le dimensionnement du transformateur à une tension légèrement supérieure à la tension nominale $\approx 6\%$. Il est parfois nécessaire d'installer la compensation au niveau de la HT et il est intéressant de connecter les condensateurs BT par un transformateur HT/BT plutôt que de payer plus cher des condensateurs HT. Dans un tel cas, la charge du transformateur est capacitive et la tension de sortie plus élevée que prévue. Ce cas peut être traité en choisissant convenablement les composants avec un niveau de tension approprié ou en choisissant le rapport de transformation par l'utilisation des prises de réglages pour la normaliser. Ce dernier cas est préférable car il évite au transformateur de fonctionner dans un état sur-magnétisé, donc avec des pertes plus importantes. Cependant, cette idée peut s'avérer dans le temps une "fausse" économie, bien que le coût d'installation soit réduit, le coût de fonctionnement se trouvant augmenté. Le courant réactif de

l'installation est transformé deux fois, de l'installation BT vers le réseau HT et du réseau HT vers les condensateurs BT, avec deux pertes de charge à payer par le client.

Les autres inconvénients de la puissance réactive, dimensionnement adapté des conducteurs et chutes de tension, apparaissent également dans toutes les lignes de distribution et dans tous les transformateurs de la partie d'installation située entre la charge inductive et l'armoire de compensation. Il vaut mieux affecter 100% du budget à la totalité de l'utilisation que 75% du budget à seulement 50% de l'utilisation.

Dans une installation répartie, chaque et toutes (même les petites) charges résisto-inductives peuvent être compensées par un condensateur intégré. Ceci est déjà mis en oeuvre avec succès, par exemple pour les tubes fluorescents équipés de ballasts magnétiques. En Allemagne et en Suisse, cette pratique est fréquemment réalisée sous la forme d'une compensation série où une lampe, associée à son ballast, n'est pas compensée tandis que l'autre est (sur) compensée par l'utilisation d'un condensateur en série, dimensionné de telle manière qu'il consomme précisément un courant de même amplitude que la branche non compensée, mais en opposition de phase.

Cependant la compensation répartie est limitée dans le cas où une machine inductive asynchrone est compensée localement et individuellement. Si le condensateur est situé en amont du contacteur moteur, alors il restera connecté lorsque le moteur sera à l'arrêt, plaçant l'installation en surcompensation. Si le condensateur est situé en aval du contacteur moteur, alors il n'est plus connecté lorsqu'elle moteur est à l'arrêt, créant un risque d'auto excitation de la machine à la décélération. Une tension est générée bien que l'équipement soit isolé de l'alimentation, voire une surtension si la capacité est mal dimensionnée.

Il semble évident maintenant que la puissance réactive n'est pas toujours indésirable. Au contraire, il convient de fournir la puissance réactive capacitive adaptée pour compenser la puissance réactive inductive et inversement, dans le cas où les charges résistives-capacitives sont majoritaires. La puissance réactive capacitive est aussi plutôt avantageuse et limite les pertes, par exemple pour exciter des générateurs asynchrones comme des éoliennes et des centrales de co-génération, si elles sont directement raccordées au réseau sans convertisseur. Elle devient même une absolue nécessité dans le cas où de tels générateurs sont sensés alimenter un réseau îloté, sans quoi il n'y a pas d'excitation, pas de tension et pas d'alimentation même si ces générateurs fonctionnent.

6.3 Désaccord d'un circuit (detuning)

Le désaccord consiste à associer à chaque condensateur de compensation une réactance en série. Une des raisons du désaccord, la limitation du courant d'appel, a déjà été mentionné précédemment. Cependant, la raison principale pour laquelle le désaccord est recommandé par tous les fournisseurs de compensateurs et par la plupart des distributeurs (et pour laquelle une majorité d'utilisateurs la mettent déjà en oeuvre) est le problème des perturbations de tension sur le réseau. Les charges électroniques modernes consomment des courants harmoniques, génèrent des distorsions harmoniques en tension (voir le fascicule du guide Power Quality 3.1 [2]) et imposent un "bruit" haute fréquence sur le réseau. Comme la réactance d'un condensateur est inversement proportionnelle à la fréquence, ces hautes fréquences peuvent être à l'origine d'un niveau de courant excessif dans le condensateur. Une inductance de désaccord permet de se prémunir de ce danger. Le dimensionnement en puissance réactive de la réactance de désadaptation est généralement de 5, 7 ou 11% de la puissance réactive du condensateur de compensation. Ce pourcentage est également nommé "facteur de désaccord" (detuning factor).

Lorsque l'on parle de dimensionnement, il peut y avoir confusion quant à savoir si la puissance réactive indiquée sur la plaque d'un compensateur est définie pour le niveau de tension de l'alimentation ou pour le niveau de tension des condensateurs (qui est plus élevé), et pour savoir si le facteur de désaccord a été pris en considération ou pas. En fait, la puissance réactive indiquée devrait toujours se rapporter au système complet (condensateurs et réactance de désaccordement) pour la tension d'alimentation à la fréquence fondamentale.

Puisque la réactance d'une inductance augmente proportionnellement à la fréquence pendant que celle d'un condensateur diminue, un facteur de désaccord de 11% à 50 Hz est déjà d'environ 100% à 150 Hz¹, ce qui signifie que les réactances capacitive et inductive sont égales (en résonance l'une avec l'autre) et s'annulent. Cela fournit une possibilité de calcul du facteur de désaccord de manière à supprimer un rang harmonique particulier de l'installation, tandis que la compensation fonctionne correctement. Ceci est décrit plus en détail au module 3.3.1 [2]. Toutefois, afin de prévenir une surcharge des condensateurs (et des inductances), il est généralement préférable d'éviter que le facteur de désaccord place la fréquence de résonance à une des fréquences harmoniques prédominantes. Plus précisément, le facteur de désaccord est choisi pour que l'association condensateur/inductance devienne inductif pour des fréquences juste en dessous du plus faible harmonique existant, et au dessus (Figure 9). Ceci permet d'éviter les résonances (Figure 10) qui pourraient sinon se produire entre les condensateurs et les autres éléments du système, en particulier avec l'inductance parasite du transformateur le plus proche, qui serait excitée par l'un des harmoniques. Les figures représentent les facteurs d'amplification en fonction de la fréquence.

1 : X_L à 50 Hz = 11% donc X_L à 150 Hz = 33% (X_L à 50 Hz). X_C à 150 Hz = 33%. Les deux sont égaux en amplitude, donc le facteur de désaccord est de 100%.

Le facteur d'amplification doit ici être compris comme étant le rapport entre le comportement du système tel qu'il est et le comportement de ce même système sans compensateur. Mais ce n'est pas la seule raison du désaccord.

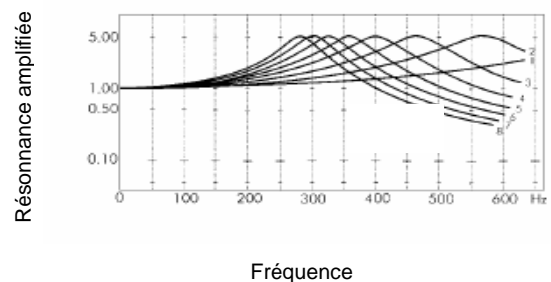


Figure 9 – Courbes de résonances de différents compensateurs dans une gamme de 50 kVAr (courbe 1) à 400 kVAr (courbe 8), alimentés par un transformateur de 1 250 kVA (Frako)

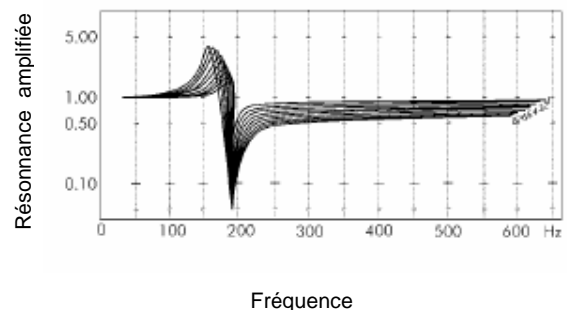


Figure 10 - Courbes de résonances de différents compensateurs désaccordés dans une gamme de 50 kVAr (courbe 1) à 400 kVAr (courbe 8), alimentés par un transformateur de 1 250 kVA (Frako)

De nos jours, les condensateurs peuvent également être facilement surchargés par les hautes fréquences omniprésentes dans les réseaux, plus hautes que la plupart des harmoniques. Même de faibles tensions hautes fréquences superposées à la tension d'alimentation, si faibles qu'elles ne sont pas visibles sur les enregistrements de tension d'un analyseur de réseau de grande qualité (Figure 11), peuvent faire circuler de forts courants à travers les condensateurs.

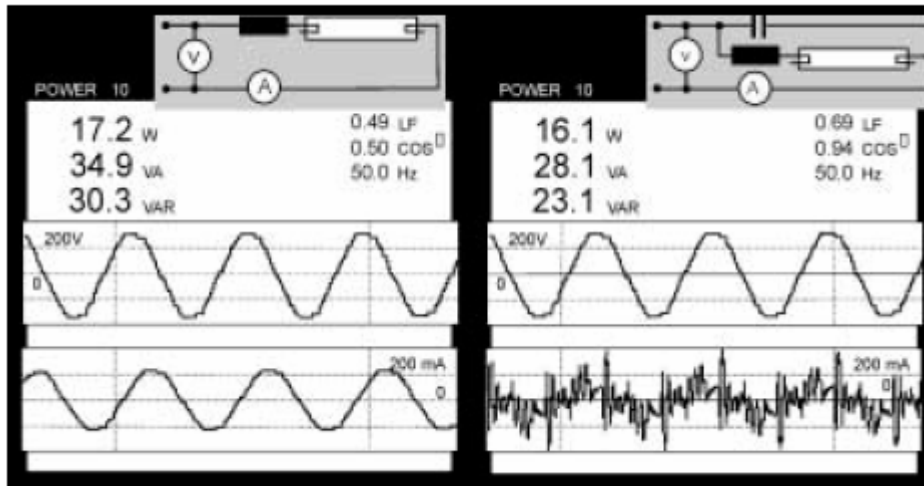


Figure 11 – lampe fluorescente sans (à gauche) et avec (à droite) compensation parallèle

A gauche, mesures sur une lampe fluorescente de 11 W à ballast magnétique, mais sans compensation. Pourtant, la très grande quantité d'énergie réactive nécessite une compensation par condensateurs. A droite, le courant du montage compensé (la connexion série du tube et du ballast, avec en parallèle un condensateur approprié) est un zigzag bizarre plutôt qu'une sinusoïde. Ce mélange supplémentaire de courants de hautes fréquences peut circuler à travers le condensateur puisque rien d'autre n'a changé dans le câblage. Les mesures le confirment. Comme le courant est presque sinusoïdal à gauche, la différence entre le facteur de puissance (également appelé facteur de charge, en anglais LF) et le $\cos \varphi$ (également appelé facteur de déplacement) est faible, alors qu'il est significatif à droite. L'explication est que le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active (50 Hz) et la puissance apparente, incluant la puissance réactive fondamentale, la puissance harmonique et la puissance parasite, tandis que le bon vieux $\cos \varphi$ (facteur de déplacement) inclut uniquement la puissance réactive fondamentale causée par le déphasage entre la tension et le courant fondamental. Le condensateur compte conduire le courant réactif (gauche) mais il est également une voie de circulation possible pour les courants harmoniques (droite) s'il n'est pas désaccordé. C'est aujourd'hui la seconde raison de la généralisation de la technique de désaccord et elle révèle combien il peut être important de désaccorder pour le fonctionnement du condensateur dimensionné à 50 Hz. L'expérience peut être reproduite avec des résultats similaires sur à peu près toutes les distributions électriques modernes, le simple fait de connecter un condensateur sur une ligne d'alimentation et d'enregistrer le courant donnera partout des résultats similaires. Il est très impressionnant de faire circuler le courant du condensateur à travers un haut-parleur correctement dimensionné. Le bruit est vraiment effroyable, mais il change et redevient un bourdonnement à 50 Hz calme et tranquille dès que le condensateur est désaccordé par une inductance.

Cet exemple montre également combien la compensation série des lampes fluorescentes peut être avantageuse car elle réalise une compensation capacitive avec un facteur de désaccord de 50% et ceci avec une inductance existante qu'il n'est pas nécessaire d'ajouter.

7 En résumé

En premier lieu, il est important de comprendre le caractère complémentaire des composants L et C afin de comprendre le marché de la compensation. Les condensateurs de compensation devraient toujours être désaccordés afin d'éviter les résonances et les surcharges engendrées par les courants harmoniques de fréquence élevée. Les systèmes de compensation dynamiques devraient être conçus pour une commutation rapide par l'utilisation de commutateurs statiques et d'algorithmes de commande intelligents. Le lieu d'installation le plus approprié d'un compensateur, qu'il soit centralisé ou réparti, a été discuté.

8 Références et Bibliographie

- [1] Wolfgang Hofmann, Wolfgang Just: Blindleistungs-Kompensation in der Betriebspraxis, VDE Verlag, Offenbach, Germany, 4th edition, 2003
- [2] Bibliothèque complète du Guide Power Quality sur www.leonardo-energy.org/France