

# AMÉLIORATION DES PERFORMANCES DES PONTS REDRESSEURS

<b>1 -Problèmes posés.....</b>	<b>2</b>
1.1 -Ponts commandés : Angle d'amorçage limite des thyristors .....	2
1.2 -Lissage Inductif : phénomène d'Empiètement.....	2
1.3 -Lissage inductif : Ondulation du courant.....	4
1.4 -Harmoniques de courant réseau.....	4
<b>2 -Ponts « Dodécaphasés » - 12 phases.....</b>	<b>6</b>
2.1 -Redresseur Dodécaphasé.....	6
2.2 -Utilisation – CCHT.....	7
<b>3 -Compensation des harmoniques de courant réseau.....</b>	<b>9</b>
3.1 -Bilan des harmoniques générés.....	9
3.2 -Utilisation des couplages de transformateur.....	10
3.3 -Utilisation d'une inductance de lissage.....	10
3.3.1 -Inductance AC.....	10
3.3.2 -Inductance DC.....	11
3.3.3 -Inductance AC ou DC ?.....	11
3.4 -Piège à harmonique.....	11
3.4.1 -Comportement du piège pour les BF.....	12
3.4.2 -Comportement du piège pour les HF.....	13
3.4.3 -Dimensionnement du piège.....	13
3.5 -Filtre actif.....	14
<b>4 -Alimentations et variateurs <math>F_p=1</math>.....</b>	<b>15</b>
4.1 -Alimentations continues à absorption sinusoïdale.....	15
4.2 -Variateurs 4Q.....	16



# 1 - PROBLÈMES POSÉS.

On rencontre des ponts redresseurs non commandés (à diodes) et commandés (à thyristors).

Les ponts à commutation forcée sont des ponts redresseurs constitués de diodes et de transistors en anti parallèle. Cette structure est celle d'un onduleur, mais elle est prévue pour fonctionner principalement du côté AC vers DC (voir §4).

En sortie des redresseurs non commandés, on place soit un condensateur (lissage capacitif, pour avoir en sortie  $V_s = \text{cte}$ ) soit une inductance (lissage inductif, en sortie  $I_s = \text{cte}$ ).

En sortie des ponts redresseurs commandés, le lissage est inductif.

## 1.1 - PONTS COMMANDÉS : ANGLE D'AMORÇAGE LIMITE DES THYRISTORS .

Le temps d'ouverture d'un thyristor (« temps de recouvrement » «  $t_q$  ») est de l'ordre de  $100\mu\text{s}$ .

Conséquence : on ne peut pas amorcer les thyristors d'un pont avec des angles trop proches de  $180^\circ$  car sinon on risque d'avoir 2 branches en conduction : celle qui tarde à s'ouvrir (à cause du  $t_q$ ) et celle qui se ferme, donc on crée un court circuit sur le réseau.

En pratique, l'angle d'amorçage limite est de l'ordre de  $150^\circ$ . On ne cherche pas à aller au delà de cet angle.

## 1.2 - LISSAGE INDUCTIF : PHÉNOMÈNE D'EMPIÈTEMENT.

Supposons que le courant de sortie du pont soit parfaitement lissé.

Les courants de lignes sont alors de forme créneau.

Mais l'inductance de la ligne (qui inclut l'inductance de fuite du transformateur d'alimentation) empêche les variations instantanées de ces courants.

Le courant de ligne phase X va augmenter progressivement pendant que le courant phase Y va diminuer progressivement : il y a empiètement de la phase X sur la phase Y (figure 1), les phases X et Y sont alors en court circuit. Le courant de court circuit n'est limité que par les inductances de lignes phases X et Y.

Pendant cette phase d'empiètement, la tension alimentant le pont est déformée (figure

2).

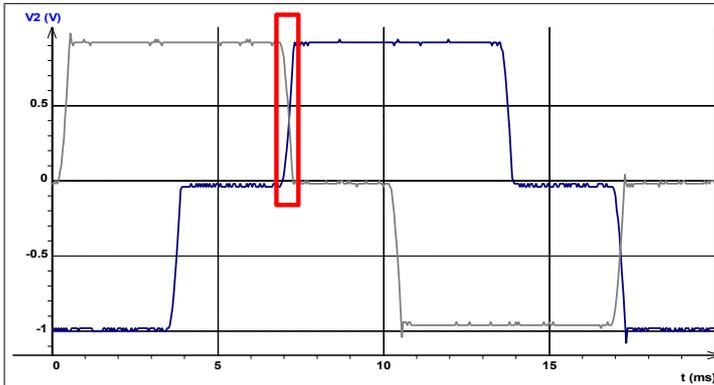


figure 1: Pont PD3 à diodes : courant ligne phase 1 et 2

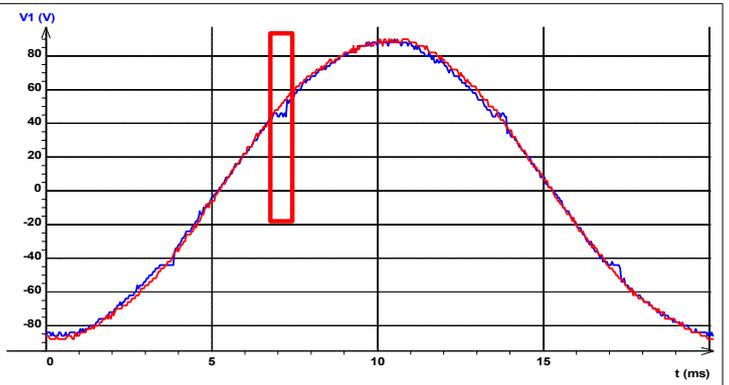


figure 2: tension simple avec et sans pont PD3

Au niveau de la tension de sortie, lors de l'empiètement, la tension redressée est aussi déformée (figure 3) .

Au final il y a une chute de la tension moyenne redressée.

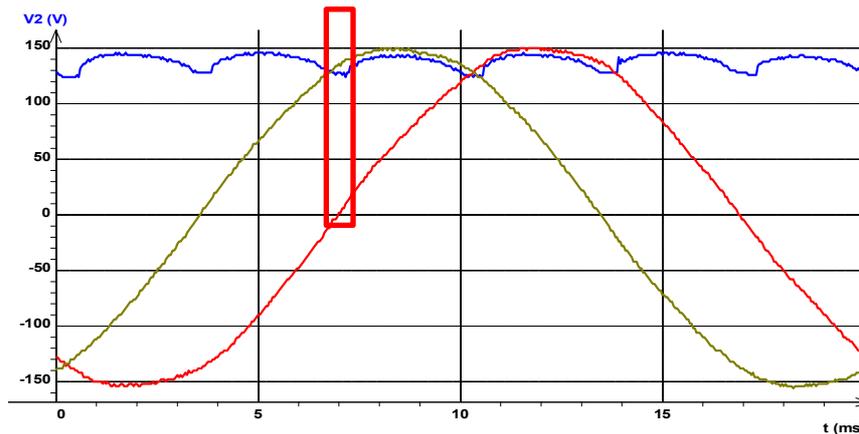


figure 3: Pont PD3 à diodes : tensions composées et tension de sortie

Le phénomène d'empiètement est donc dû aux inductances de ligne et aux inductances de fuite des transformateurs. Ce phénomène augmente avec le nombre de commutations du redresseur. On ne peut pas le corriger.

### 1.3 - LISSAGE INDUCTIF : ONDULATION DU COURANT.

Les ponts commandés à lissage inductif alimentent les Mcc.

Ces machines ne fonctionnent pas correctement lorsque le courant n'est pas constant : pertes supplémentaires, vibrations.

Lorsqu'on se retrouve en conduction discontinue, on perd le contrôle de la machine (relation E/S du pont redresseur non valable).

Pour réduire l'ondulation du courant, il faut choisir si c'est possible un pont redresseur avec un faible taux d'ondulation sur la tension (PD3 meilleur que PD2).

L'inductance de lissage se calcule à partir du type de pont (fréquence de l'ondulation et ondulation de tension) et de l'ondulation de courant que l'on désire (voir chap 11.2).

### 1.4 - HARMONIQUES DE COURANT RÉSEAU.

Les harmoniques de courant que demande un pont redresseur, en circulant dans les inductances de ligne, créent des harmoniques de tension et donc déforment la tension au point de livraison.

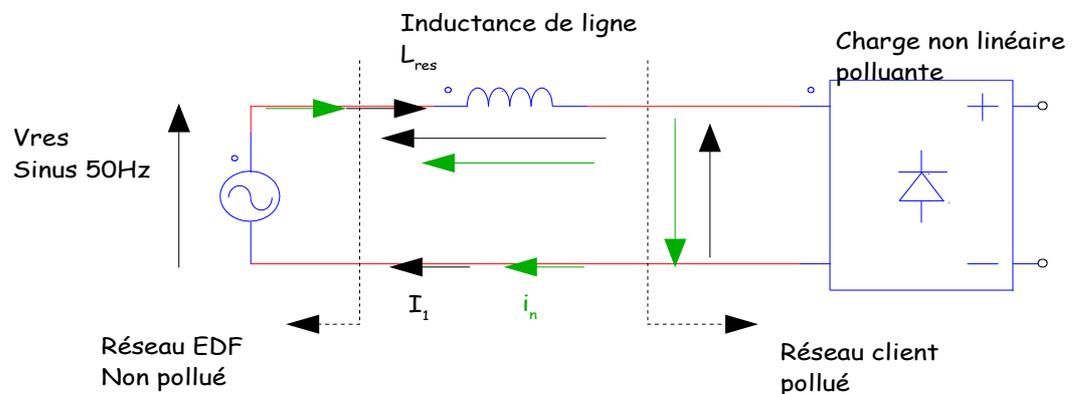


figure 4: Apparition d'harmonique de tension

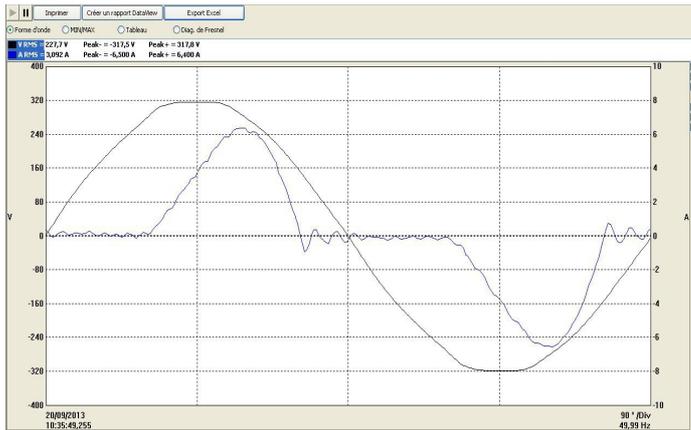


figure 5: tension et courant coté réseau EDF



figure 6: tension et courant coté charge non linéaire

Si la tension est déformée, il apparaît des harmoniques de puissance. Ces harmoniques ne servent à rien pour le fonctionnement des appareils, ce ne sont que des pertes supplémentaires (chaleur) pouvant entraîner des vibrations mécaniques.

La durée de vie des appareils soumis à cette tension déformée va être réduite.

À part pour les appareils « grand public » consommant moins de 16A par phase, il n'y a pas encore de norme quant aux harmoniques de courant (CEI 61000-3-X ; norme CEI 61000-3-12 à venir).

Mais sur une installation électrique, la qualité de la tension doit être suffisante pour respecter la norme CEI 61000-2-X.

Un client doit donc s'assurer que ses variateurs ne polluent pas trop sa tension.

Dans le cas contraire, il a tout intérêt à compenser les harmoniques de courant, déjà pour maintenir la durée de vie de ses appareils.

## 2 -PONTS « DODÉCAPHASÉS » - 12 PHASES.

Un pont PD2 est un redresseur double alternance ou « biphasé » : la tension de sortie a une fréquence égale à  $2 \times f \Rightarrow$  harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 3 ; 5 -7 ; 9 -11 etc...

Un pont PD3 redresse les tensions composées, c'est un redresseur « hexaphasé » : fréquence en sortie =  $6 \times f \Rightarrow$  harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 5-7 ; 11-13 etc...

On s'aperçoit donc qu'en augmentant le nombre de phases de redressement , on diminue l'ondulation de la tension de sortie et les harmoniques du courant réseau s'éloignent du fondamental.

Les ponts « X-phasés » sont réalisés en associant en série des redresseurs PD3 alimentés par différents transformateurs (pour créer un décalage de  $(360 / X)^\circ$  entre les tensions redressées).

### 2.1 - REDRESSEUR DODÉCAPHASÉ.

Le redresseur « dodécaphasé » est un redresseur à 12 phases (soit  $30^\circ$  par phase).

L'ondulation de la tension de sortie d'un dodécaphasé est plus faible (fréquence  $12 \times f$  ), le TDH de son courant réseau est plus faible (harmoniques de rang 1 ; 11-13 ; 23-25 ...), le facteur de puissance est meilleur.

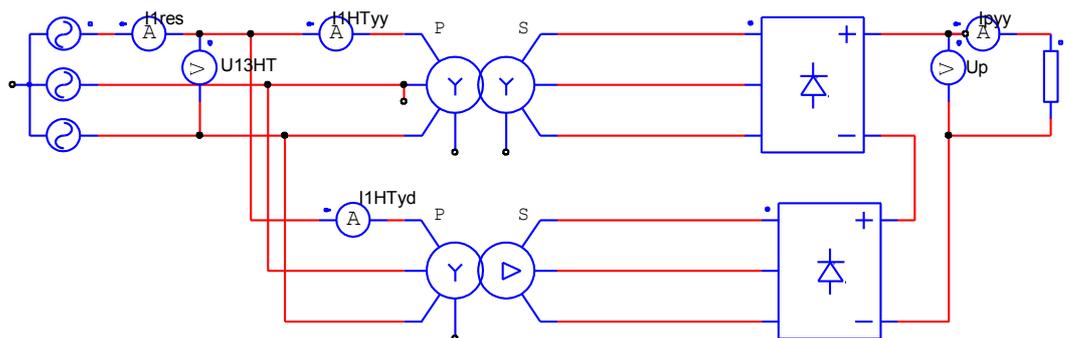


figure 7: structure d'un pont dodécaphasé

Le transformateur Yd décale les tensions de  $30^\circ$  par rapport à celles du réseau.

Les sorties des redresseurs sont mises en série. La tension  $U_p$  récupérée est la somme d'un pont PD3 « normal » (transformateur Yy) et d'un pont PD3 décalé de  $30^\circ$  (Yd).

La fréquence de l'ondulation de la tension de sortie est donc doublée par rapport à un PD3.

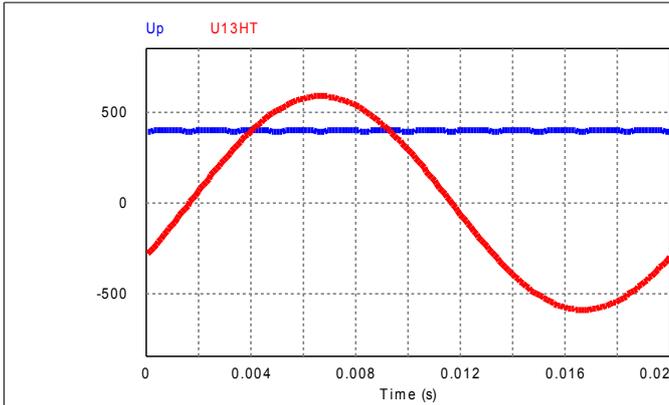


figure 8: tensions réseau HT u13 et sortie du pont

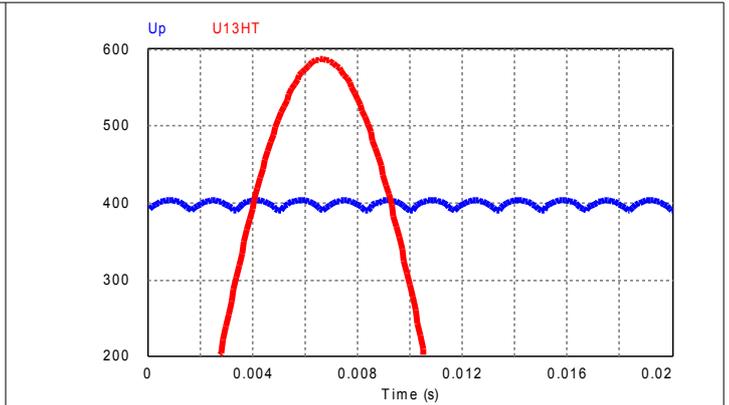


figure 9: détail tensions u13 HT et sortie du pont

Le courant réseau comporte 12 niveaux différents au lieu de 6 pour le PD3, ce qui explique que le TDH et le Fp soit meilleur qu'un PD3.

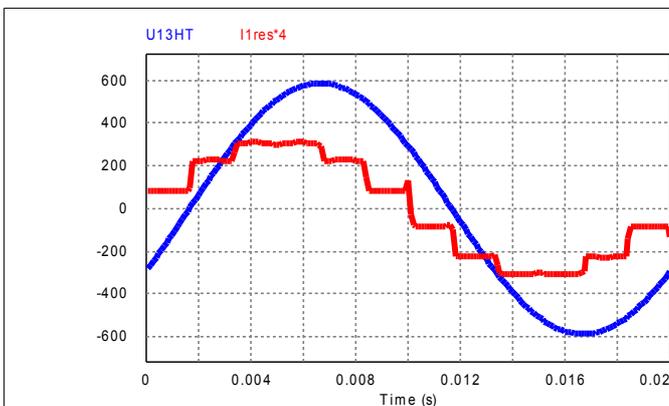


figure 10: tension u13 HT et courant ligne phase 1

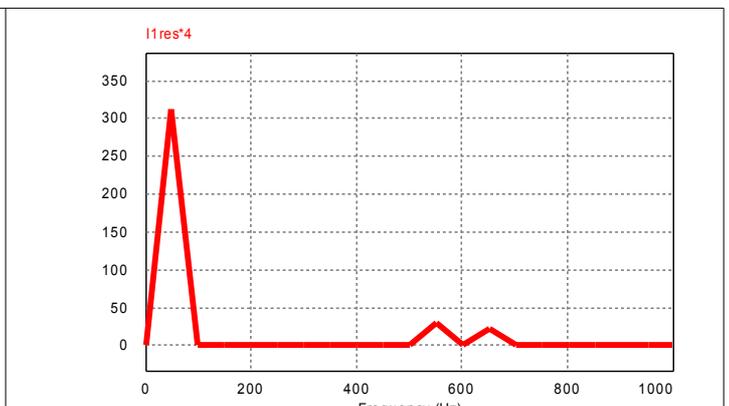


figure 11: spectre courant ligne

Le problème de ces ponts « X-phasés » est qu'en augmentant le nombre de commutations par phase, on augmente le phénomène d'empiètement.

## 2.2 - UTILISATION – CCHT.

On a développé des redresseurs à 12 ; 18 ou 24 phases pour les ponts de très forte puissance utilisés notamment pour :

- l'alimentation des électrolyses fabricant l'aluminium (voir document de Mr Solaz sur le site du BTS),
- les liaisons Courant Continu Haute Tension.

Le transport d'électricité en courant continu (CCHT) permet de s'affranchir du côté inductif des lignes aériennes ou du côté capacitif des lignes enterrées : il n'y a pas de compensation de réactif à faire régulièrement.

Ce mode de transport est rentable sur les longues distances.

Pour gérer l'échange d'énergie, les redresseurs sont commandés.

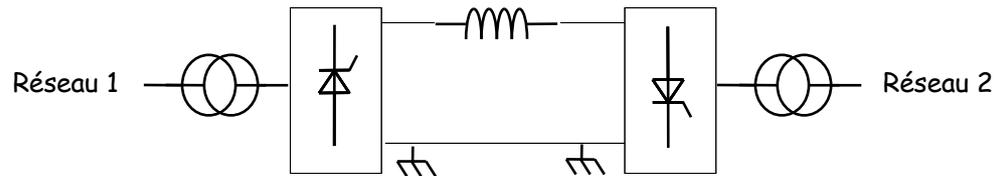


figure 12: structure d'une liaison CCHT

Ce type de liaison permet de connecter des réseaux « non synchrones » mais de même fréquence ou carrément de fréquences différentes.

C'est ce type de liaison qui permet de relier les réseaux européens et anglais (liaison IFA 2000) et d'alimenter les îles de Corse et de Sardaigne à partir de l'Italie.



## 3 - COMPENSATION DES HARMONIQUES DE COURANT RÉSEAU.

La compensation d'harmonique fonctionne sur le même principe que la compensation de réactif :

la charge a besoin d'un certain type de courant (déphasé – riche en harmonique) mais le réseau ne veut fournir qu'un courant sinusoïdal 50Hz en phase avec la tension.

Il faut donc placer en parallèle au réseau une installation capable de fournir à la charge ce que ne veut pas le réseau.

Toutes les informations présentées ci-dessous sont issues :

- du « cahier technique Schneider n°152 »,
- du document « réduction des harmoniques – les solutions Danfloss VLT Drives ».

### 3.1 - BILAN DES HARMONIQUES GÉNÉRÉS.

Un pont monophasé PD2 génère des harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 3 - 5 ; 7-9 etc.. (harmoniques de rang impair car courant alternatif)

Un pont triphasé PD3 génère des harmoniques de courant réseau de rang 1 ; 5 - 7 ; 11-13 etc.. (absence de rangs multiples de 3 car absence du conducteur de neutre).

Comparatif ponts à lissage capacitif et inductif :

	Lissage capacitif $U_p = cte$	Lissage inductif $I_s = cte$
Tension de sortie	<b>Vin-max</b> PD2 : $U_{pDC} = V_{res} \sqrt{2}$ PD3 : $U_{pDC} = U_{res} \sqrt{2}$	<Vmax PD2 : $U_{pDC} = 0.9 V_{res}$ PD3 : $U_{pDC} = 2.34 V_{res}$
Courant réseau	Impulsionnel PD2 : 1 impulsion / demi période PD3 : 2 impulsions TDH >100%	Créneau PD2 : carré PD3 : créneau 30° <b>TDH &lt;50%</b>
Fp	~0.5	<b>PD2 : 0,9</b> <b>PD3 : 0,95 &gt;0.93</b>
Fabrication	<b>Simple – valeurs normalisées</b>	Inductance à fabriquer, lourde et

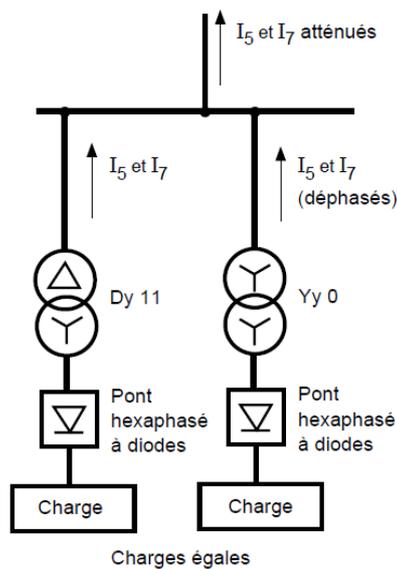
	supporte un peu de retour de courant	volumineuse pas de retour de courant
--	--------------------------------------	-----------------------------------------

Le lissage inductif est donc plus performant coté réseau, mais le volume et le poids fait que l'on préfère utiliser des redresseurs à lissage capacitif.

### 3.2 - UTILISATION DES COUPLAGES DE TRANSFORMATEUR.

Comme on le voit dans le TD « influence d'un Dy », le couplage triangle permet de piéger les composantes homopolaires (donc les harmoniques de rang 3, 9, 15 ..).

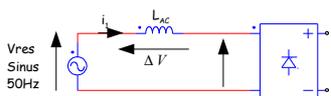
La mise en parallèle de ponts redresseurs de puissance équivalente alimentés un par un Yy, l'autre par un Dy, permet aussi de limiter les harmoniques de rang 5 et 7 (comme pour les redresseurs dodécaphasés présentés au §2).



### 3.3 - UTILISATION D'UNE INDUCTANCE DE LISSAGE.

Cette inductance de lissage peut être placée soit coté réseau (AC) soit en sortie du pont (DC).

#### 3.3.1 - INDUCTANCE AC.



Une inductance placée coté réseau va limiter les variations du courant (« lisser le courant ») donc diminuer les harmoniques HF.

Mais l'effet de cette inductance s'ajoute à celles de la ligne : la déformation de la tension va augmenter, les performances de la charge vont diminuer.

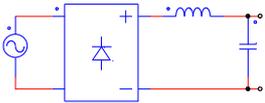
Une inductance AC se choisit en fonction de la chute de la tension qu'elle va introduire

pour le fondamental.

Cette chute de tension doit être supportable par le variateur et le moteur (norme 61000-2-X). En général elle est de l'ordre de 3 à 5%.

L'inductance est donc choisie avec la relation :  $\Delta V = L_{AC} \omega I_f$ .

### 3.3.2 - INDUCTANCE DC.



En sortie du pont redresseur, on trouve donc un filtre L+C//R.

Ce filtre est un passe bas d'ordre 2 :

- de fréquence propre  $LC \omega_0^2 = 1$
- d'amortissement  $m = \frac{1}{2R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ,
- fréquence de résonance :  $f_R = f_0 \times \sqrt{1 - 2m^2}$  si  $m < 1/\sqrt{2}$ .

Ce filtre ne doit laisser passer que la composante continue ( $0 \leq f_0 \leq f_{pont}$ ), mais il faut s'assurer que la fréquence de résonance n'est pas sur un des rangs d'harmonique de la tension redressée ( $f_R \neq k \times f_{pont}$ ).

### 3.3.3 - INDUCTANCE AC OU DC ?

L'inductance coté AC limite les harmoniques de courant, mais dégrade la qualité de la tension et donc les performances du système.

L'inductance coté AC n'est placée par l'utilisateur que si l'on constate une déformation de la tension.

L'inductance coté DC est incluse dans un variateur et transforme le pont à lissage capacitif en pont à lissage légèrement inductif, elle améliore légèrement les performances coté réseau sans le perturber.

C'est parce qu'ils incluent une inductance de ce type que les variateurs type ATV 312 Schneider ou Unidrive Leroy Somer annoncent de « meilleures performances sur les harmoniques de courant » (par rapport à des variateurs sans inductance DC).

## 3.4 - PIÈGE À HARMONIQUE.

On utilise un piège à harmonique si l'inductance de lissage AC ne suffit pas.

Il y a 1 piège pour 1 rang d'harmonique. Le piège est placé en parallèle avec le variateur.

Le piège à harmonique est constitué d'une inductance en série avec un condensateur.

Les valeurs de  $L_0$  et  $C_0$  sont choisies pour annuler l'impédance du piège pour un rang  $n_0$  d'harmonique de courant.

Ainsi l'harmonique de courant de rang  $n_0$  sera piégée : elle passera dans le piège plutôt que de circuler sur le réseau.

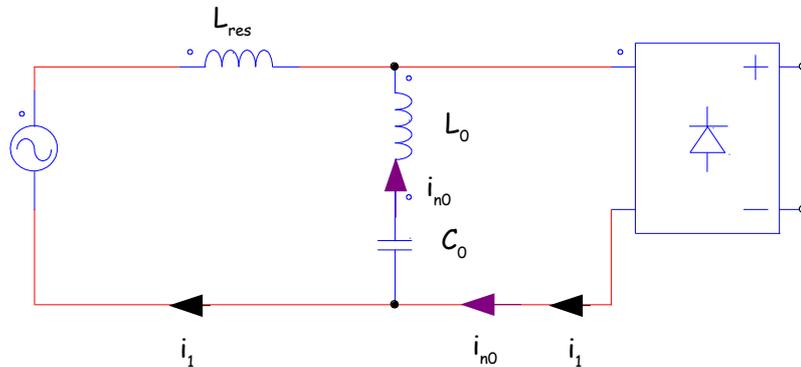


figure 13: Circulation des harmoniques de courant avec un piège de rang  $n_0$

L'impédance équivalente du filtre est  $Z_{LC} = Z_L + Z_C$

$$Z_{LC} = jL_0\omega + \frac{1}{jC_0\omega} = \frac{1 - L_0C_0\omega^2}{jC_0\omega}$$

Pour piéger l'harmonique de rang  $n_0$  il faut que  $L_0C_0\omega_0^2 = 1$

en notant  $\omega_1$  la pulsation du réseau ( $\omega_1 = 2\pi \times 50\text{Hz}$ ):  $L_0C_0n_0^2\omega_1^2 = 1$

En notant  $Z_{res} = jL_{res}\omega$  l'impédance du réseau, et en appliquant la relation du diviseur de courant, on montre que les harmoniques des courants variateurs  $i_{tot}$ , piège  $i_{LC}$  et réseau  $i_{res}$  vérifient les relations :

$$I_{LC} = I_{tot} \times \frac{Y_{LC}}{Y_{LC} + Y_{res}} = I_{tot} \times \frac{Z_{res}}{Z_{LC} + Z_{res}}$$

$$I_{res} = I_{tot} \times \frac{Y_{res}}{Y_{LC} + Y_{res}} = I_{tot} \times \frac{Z_{LC}}{Z_{LC} + Z_{res}}$$

$$\frac{I_{LC}}{I_{res}} = \frac{Z_{res}}{Z_{LC}}$$

### 3.4.1 - COMPORTEMENT DU PIÈGE POUR LES BF.

À la fréquence du réseau, l'influence du condensateur est majoritaire.

En utilisant :

$$jLn_0\omega_1 + \frac{1}{jC_0n_0\omega_1} = 0 \Leftrightarrow n_0jL_0\omega_1 = -\frac{1}{jC_0n_0\omega_1} \Leftrightarrow jL_0\omega_1 = -\frac{1}{jC_0n_0^2\omega_1}$$



on écrit  $Z_{LC-1} = jL_0\omega_1 + \frac{1}{jC_0\omega_1} = -\frac{1}{jC_0n_0^2\omega_1} + \frac{1}{jC_0\omega_1} = \frac{1}{jC_0\omega_1} \times \left( \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2} \right)$

À la fréquence du réseau, le piège se comporte comme un condensateur de capacité  $C_1 = C_0 \times \left( \frac{n_0^2}{n_0^2 - 1} \right)$ .

### 3.4.2 - COMPORTEMENT DU PIÈGE POUR LES HF.

Au delà de la fréquence d'accord, l'influence de l'inductance est majoritaire.

En utilisant :

$$jL_0n_0\omega_1 + \frac{1}{jC_0n_0\omega_1} = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{jC_0n_0\omega_1} = -n_0jL_0\omega_1 \Leftrightarrow \frac{1}{jC_0\omega_1} = -jL_0n_0^2\omega_1$$

$$Z_{LC-n} = jL_0n\omega_1 + \frac{1}{jC_0n\omega_1} = jL_0n\omega_1 - jL_0\frac{n_0^2}{n}\omega_1 = jL_0n\omega_1 \times \left( 1 - \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 \right)$$

Au delà de la fréquence d'accord ( fréquence  $n \times f_1$  ), le piège se comporte comme une inductance de valeur

$$L_n = L_0 \times \left( 1 - \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 \right)$$

### 3.4.3 - DIMENSIONNEMENT DU PIÈGE.

Il faut avant tout avoir un relevé des puissances et du spectre du courant réseau.

- Le piège est accordé sur l'harmonique de courant le plus important.
- Le condensateur est choisi pour compenser la puissance réactive de l'installation :

$$Q_{CI} + Q = P \tan 21^\circ \quad \text{avec} \quad C_1 = C_0 \times \left( \frac{n_0^2}{n_0^2 - 1} \right)$$

Les valeurs de condensateurs sont normalisées.

Le choix du condensateur se fait en fonction de la tension efficace qu'il doit supporter.

Les harmoniques de tensions dépendent des harmoniques de courant passant dans le

piège :  $\underline{I}_{LCn} = jCn\omega_1 U_{Cn}$

- L'inductance est choisie pour accorder le piège :

$$L_0 C_0 n_0^2 \omega_1^2 = 1$$

On fabrique l'inductance « sur mesure » (à la valeur désirée).

Le choix de l'inductance se fait en fonction du courant efficace qui la traverse.

Il faut prendre en compte les harmoniques du courant passant dans le piège.



- On calcule les harmoniques des courants de rang  $n_0 + 2$  circulant dans le piège et sur le réseau avec les relations du diviseur de courant pour vérifier s'il y a besoin de rajouter un autre piège à ce rang là.

### 3.5 - FILTRE ACTIF.

En dernier recours, un filtre actif permettra de complètement éliminer le reliquat d'harmoniques.

Cet appareil, branché sur le réseau, surveille le courant appelé par l'installation et fabrique à la place du réseau les harmoniques de courant demandés.

Cet appareil est complètement paramétrable (on peut choisir de compenser ou non le réactif, et choisir les harmoniques à fabriquer) et se choisit en fonction du courant efficace que l'on veut compenser.

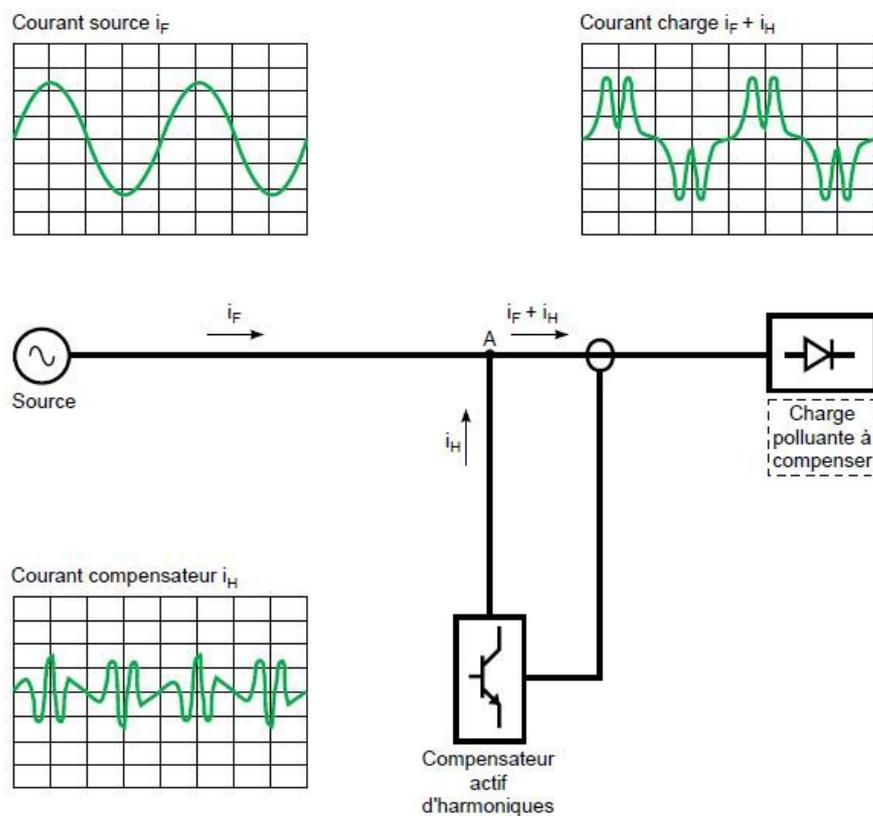
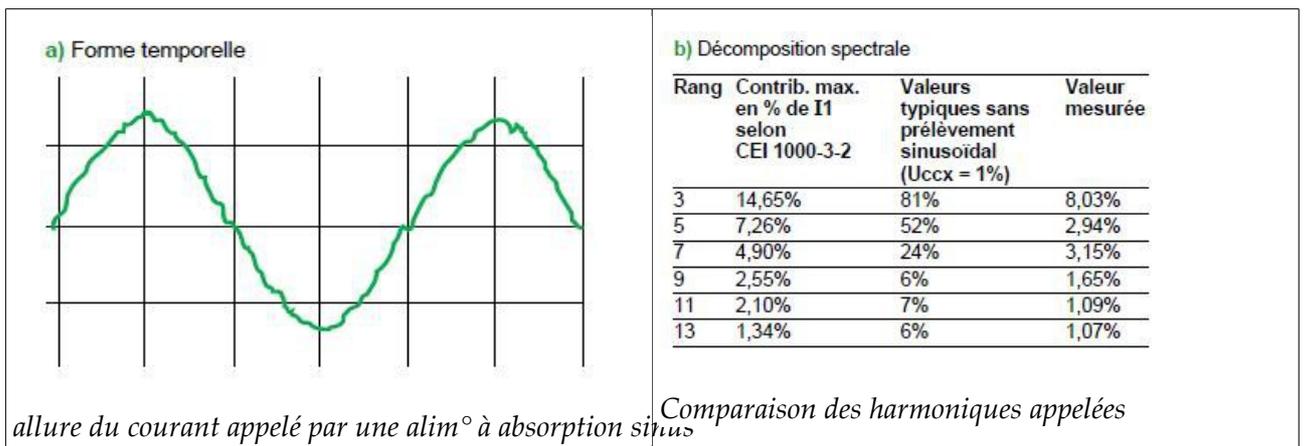


Illustration 1: principe d'un filtre actif - cahier technique Schneider n°183

## 4 -ALIMENTATIONS ET VARIATEURS $F_p=1$ .

### 4.1 - ALIMENTATIONS CONTINUES À ABSORPTION SINUSOÏDALE.

Ces alimentations de dernière génération permettent toujours de fournir une tension continue, avec un rendement équivalent aux alimentations à découpage, mais le redresseur de tête est commandé pour appeler un courant quasiment sinusoïdal et en phase avec la tension.



### Slimline Power System

48V DC Outside Plant and Customer Premise Solution

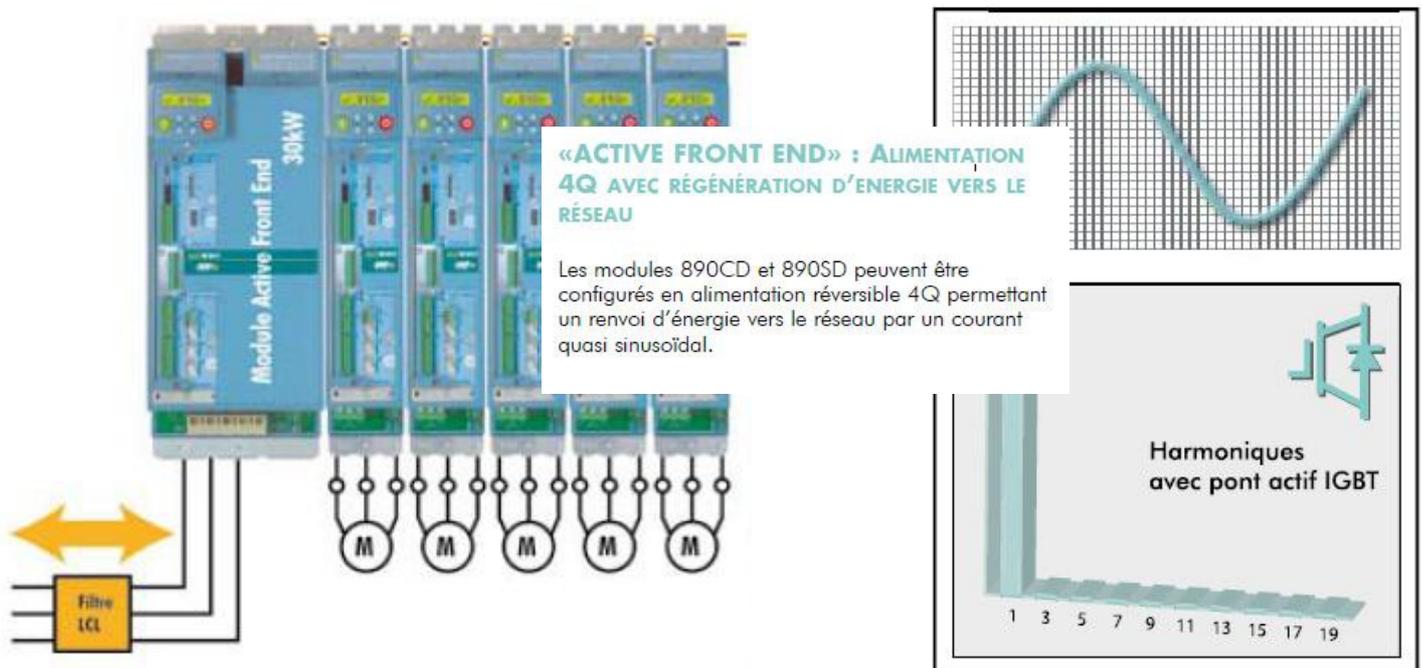
- Customer premise power for converged networks
- Large plant features in a small plant package
- 3000 Watts / 60 Amps single capacity in 1RU
- 10.3 inches (264mm) depth where space is restricted
- Greater than 90% efficiency

Input	
Voltage Range - Low-Line - High-Line	90 – 175 Vac (500W) 176 – 290 Vac (1000W)
Input Frequency	45-65 Hz
Input Current	6 Amps
Inrush Transient	16 Apk
Total Harmonic Distortion (THD)	< 5 %
Power Factor	~1.0
Holdup Time	>10 ms full power

## 4.2 - VARIATEURS 4Q.

Avec un variateur classique pour machines alternatives (brushless, asynchrone), lors des phase de freinage, l'énergie électrique produite par la machine est dissipée dans une résistance de freinage, car le redresseur à diodes de tête n'est pas réversible en courant.

Les nouveaux variateurs (comme le 890 de Parvex) ont coté réseau un « pont à commutation forcée » qui permet de renvoyer l'énergie vers le réseau, et d'appeler un courant quasiment sinusoïdal et en phase avec la tension.



La structure de ce pont est celle d'un onduleur. La tension à l'entrée du pont (coté réseau) est donc une tension MLI.

Donc entre ce pont et le réseau, il doit y avoir une inductance de lissage pour rendre le courant réseau sinusoïdal.

