

Cours technique sur la correction du facteur de puissance



- Puissance active, réactive et apparente
- Le facteur de puissance
- Les inconvénients d'un mauvais facteur de puissance
- La compensation du facteur de puissance
- Types de compensations
- Dimensionnement de batteries de condensateurs automatiques
- Compensation dans des réseaux comportant des harmoniques
- Influence des condensateurs sur des réseaux comportant des harmoniques
- Batteries de condensateurs avec ou sans selfs-séries
- Batteries de condensateurs avec selfs-séries en pratique

M-TEC ENERGY bvba

Nijverheidsstraat 26 Industriezone ITTERBEEK

B-2570 DUFFEL Belgium

Tel: +32 (0)3/490 40 90 - Fax: +32 (0)3/490 40 99

e-mail : info@mtenergy.com

www.mtenergy.com



1. Introduction

Lors de la distribution et de l'utilisation de l'énergie électrique, on ne consacre généralement pas l'attention nécessaire à l'élément complexe qu'est la batterie de condensateurs.

A première vue cet élément est très simple, cependant l'implantation dans une installation électrique n'est pas évidente.

Afin de faire circuler l'énergie aussi économiquement que possible, ainsi que d'assurer son transport avec les réserves nécessaires, il importe que la batterie de condensateurs soit considérée avec attention.

La problématique croissante des réseaux ne simplifie certainement pas la sélection du produit.

L'objectif de ces notes est de vous transmettre le jargon de la profession, de vous présenter les applications inhérentes à chaque produit afin de rationaliser le choix d'une batterie de condensateurs.

2. Puissance active

Lorsqu'un réseau est uniquement chargé par un circuit résistif, le courant (I) dans ce consommateur est en phase avec la tension (U). En d'autres mots le courant et la tension s'annulent au même instant. Du produit des valeurs instantanées I et U, nous obtenons la puissance utile (P). Sur la (Fig. 1) nous constatons que cette puissance est toujours positive et que sa fréquence est le double de celle du réseau.

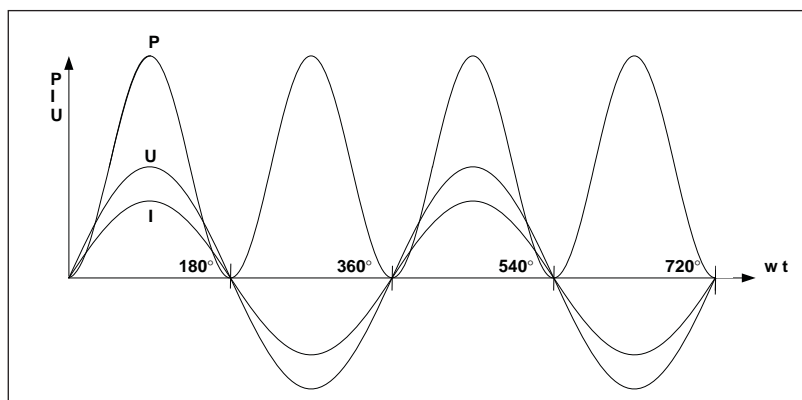


Fig. 1 : Tension, courant et puissance en cas de circuit résistif. ($\varphi = 0$) ($\cos \varphi = 1$)

Un four électrique, un radiateur, une lampe à incandescence, constituent des résistances. Ces récepteurs électriques fournissent de l'énergie disponible sous diverses formes (ex : thermique, mécanique, lumineuse).

Une résistance absorbe une puissance active (Watt (W)) déterminée par le produit de la tension et du courant.

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

(W) (V) (A)

($\sqrt{3}$ car on travaille en triphasé)

3. La puissance réactive

Un tel circuit résistif se rencontre peu en pratique. Les moteurs, transformateurs et autres appareils fonctionnent sur l'effet des champs électromagnétiques, prélèvent en plus de l'énergie nécessaire à leur travail effectif ou utile, une énergie pour l'établissement des champs magnétiques. Cette énergie dite réactive correspond à une puissance en quadrature avec la puissance active. Cette fois-ci, la puissance (U.I) est négative à certains moments (Fig. 2).

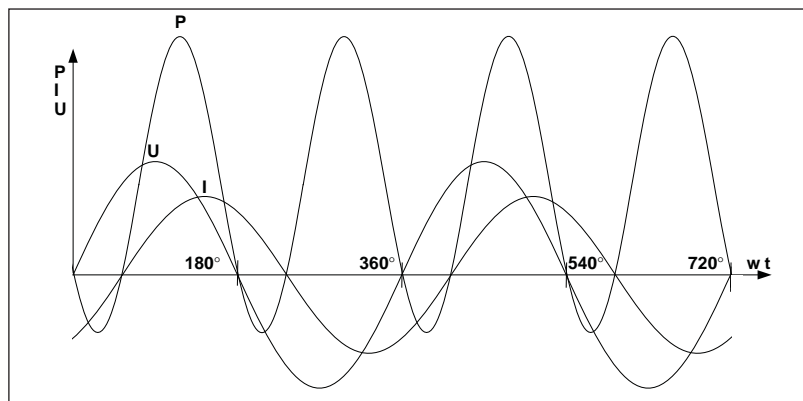


Fig. 2: Tension, courant et puissance en cas de circuit résistif et selfique.

La puissance active s'exprime de la façon suivante :

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

(W) (V) (A)

Puissance active= Puissance réelle

La puissance réactive s'exprime de la façon suivante

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

(VAr) (V) (A)

Puissance apparente= Puissance oscillant entre le generateur et la charge pour la création du champ magnétique.

Lorsque les courbes de tension et de courant sont déphasées de 90°, la courbe de puissance est pour la moitié positive et pour l'autre négative. La puissance active est donc nulle, car les deux parties s'équilibrent. La puissance réactive est maximale.

On distingue les puissances réactives inductive et capacitive :

Puissance réactive-inductive

- Le courant est en retard par rapport à la tension.
- Une puissance réactive est prélevée.
- Application :
 - Moteurs asynchrones
 - Transformateurs
 - Ligne électrique aérienne
 - Machines synchrones sous-dimensionnées

Puissance réactive capacitive

- Le courant est en avance par rapport à la tension.
- Une puissance réactive est fournie.
- Application :
 - Condensateurs
 - Câbles
 - Ligne haute-tension non chargée
 - Machines synchrones sur-dimensionnées

4. La puissance apparente

La puissance apparente détermine la charge du réseau ainsi que celle des câbles d'alimentation. Les transformateurs, générateurs, appareils de manœuvre, fusibles et câbles doivent être dimensionnés pour la puissance apparente.

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

(VA) (V) (A)

Puissance apparente = Multiplication de la tension du courant efficace sans tenir compte du déphasage

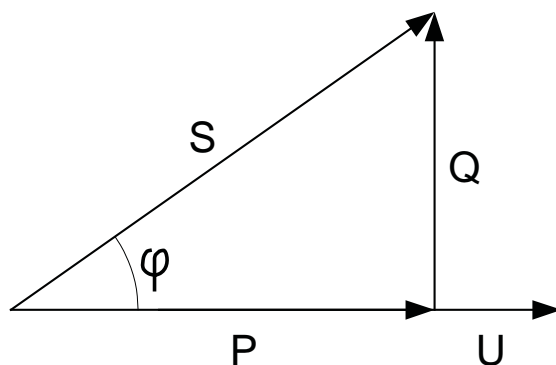


Fig. 3: Graphique des puissances.

On peut également exprimer la puissance apparente en fonction des puissances actives et réactives:

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}$$

(VA) (W) (VAr)

5. Le facteur de puissance

On désigne l'angle entre la puissance active et apparente par la lettre **phi** (φ). Le $\cos \varphi$ est donc le rapport entre la puissance active et apparente.

Facteur de puissance $PF = P/S$ ($= \cos \varphi$) (en l'absence de charges non linéaires)

(W) (VA)

En cas de présence d'harmoniques ou de charges non-linéaires, il y a une différence entre le $\cos \varphi$ et le facteur de puissance. Le $\cos \varphi$ est en relation avec le déphasage entre tension et courant à 50 Hz, alors que le facteur de puissance est en rapport avec la puissance active et réactive, toutes fréquences considérées. Lors de la détermination de la puissance d'une batterie de condensateurs, on travaille la plupart du temps sur base du $\cos \varphi$. Dans la pratique, on fait peu de différence car l'écart est faible.

On peut également travailler avec le concept $\tan \varphi$. A partir du graphique des puissances, on obtient :

$$\tan \varphi = Q / P$$

(VAr) (W)

6. Les inconvénients d'un mauvais facteur de puissance

La charge du réseau:

Plus l'installation consomme de l'énergie réactive, plus le $\cos \varphi$ est faible, autrement dit plus il est mauvais. Pour une même puissance consommée, plus le $\cos \varphi$ sera faible, plus la puissance apparente sera élevée, donc plus le courant absorbé sera grand. Avec un $\cos \varphi$ de 0,5 le courant appelé est le double du courant utile.

Pour une même puissance, il faut donc transporter dans tous les circuits électriques une intensité d'autant plus grande que le $\cos \varphi$ est mauvais.

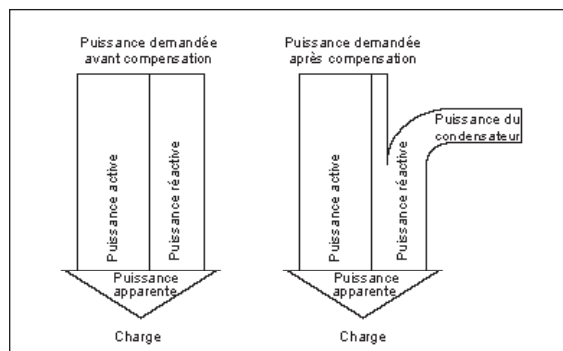


Fig. 4: Equilibre des puissances.

Cela entraîne une surcharge des câbles, des générateurs, des appareillages de commutation et des transformateurs de distribution ainsi qu'une augmentation des pertes (fonction du carré du courant) dans ceux-ci. Et cela aussi bien dans l'installation intérieure qu'entre la centrale et l'arrivée au poste de comptage.

Après compensation (par le placement de condensateurs) la puissance réactive prélevée sur le réseau est plus faible. Une partie de la puissance réactive fait la navette entre les condensateurs et la charge et ne constitue donc plus une charge pour le réseau. Le transformateur, les câbles et les dispositifs de commutation entre les batteries de condensateurs et les points d'alimentation sont pour une part délestés.

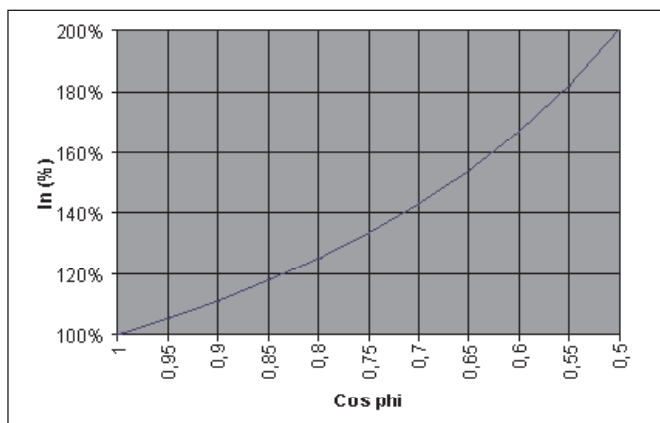


Fig. 5: Evolution du courant en fonction du cos phi à puissance active constante.

Coût de l'énergie active:

Les fournisseurs d'énergie doivent non seulement générer dans la machine de production l'énergie réactive, mais en plus dans les lignes et transformateurs haute tension. Ceci conduit à surdimensionnement des machines de production ou à l'installation des batteries de condensateurs haute tension. C'est pourquoi les sociétés de distribution font payer les consommations d'autant plus cher que le cos phi est mauvais.

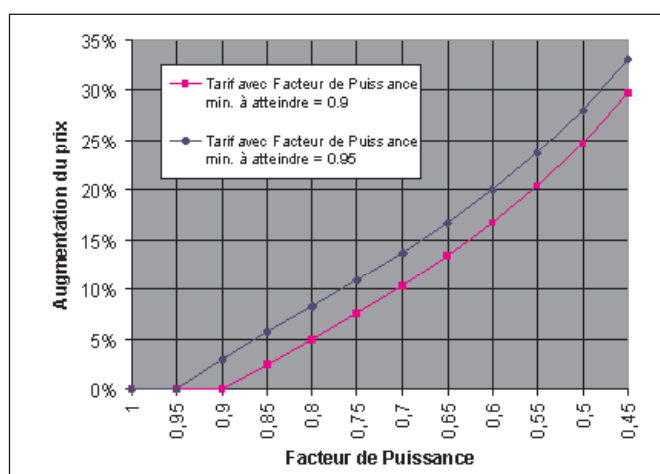


Fig. 6 : Evolution du prix du kWh en fonction du cos phi.

Pour ces différentes raisons, il y a donc lieu de réduire le plus possible la consommation d'énergie réactive, c'est à dire d'avoir le facteur de puissance le plus élevé possible. Suivant la tarification appliquée par le fournisseur d'électricité, le facteur de puissance mensuel moyen minimum doit être de 0,9 ou 0,95 pour éviter la facturation de la majoration pour consommation réactive. Si le réseau est rendu capacitif par excès de compensation (cos phi supérieur à 1,00), une majoration est de nouveau facturée.

Dans la pratique lorsque la consommation en énergie réactive (inductive + capacitive) est inférieure ou égale à 48,4% de la consommation en énergie active (cos phi 0,9), la consommation réactive n'est pas comptée. Si la consommation réactive est supérieure à 48,4% de la consommation active, la surconsommation est comptabilisée et reprise dans les frais de distributions sur la facture mensuelle.

7. La compensation du facteur de puissance

Considérons un cas de charge inductive, avec P la puissance active, Q1 la puissance réactive inductive et S1 la puissance apparente.

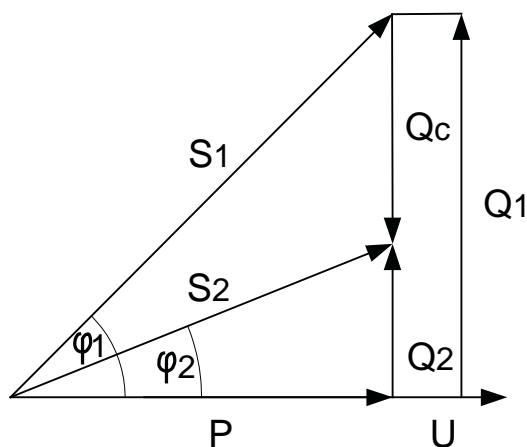


Fig 7: Triangle des puissances avec compensation.

Par l'installation d'une batterie de condensateurs (représentant une puissance réactive Q_c , qui s'oppose à Q_1) on ne prélève plus que Q_2 sur le réseau. La puissance apparente devient S_2 avec $S_2 < S_1$. Puisque la puissance est proportionnelle au courant, celui-ci baisse également.

$$Q_c = Q_1 - Q_2$$

$$Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2)$$

(VAr) (W)

Exemple:

Sur site, on mesure aux bornes d'un transformateur d'alimentation un courant de 1200 A sous une tension de 394 V. Il n'y a pas de condensateurs de compensation du $\cos \varphi$ et on mesure $\cos \varphi = 0,78$. Que deviennent les puissances et le courant débité si on ramène le $\cos \varphi$ à 0,92 par l'installation de condensateurs ?

- *Puissance active:*
 $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 \cdot 0,780 = 638 \text{ kW}$
- *Puissance réactive:*
 $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 \cdot 0,625 = 511 \text{ kVAr}$
- *Puissance apparente:*
 $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 1,73 \cdot 394 \cdot 1200 = 818 \text{ kVA}$

Puissance du condensateur nécessaire pour ramener le $\cos \varphi$ de 0,78 à 0,92 sous une charge de 638 kW.

- *Puissance du condensateur :*
 $Q_c = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2) = 638 \cdot (0,802 - 0,426) = 240 \text{ kVAr}$

La puissance active est propre à l'installation et reste identique après compensation. Cependant le courant pour générer cette puissance sera plus faible grâce au meilleur $\cos \varphi$.

- Le nouveau *courant* devient:
 $P = 638 \text{ kW} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$
 $\Rightarrow I = P / \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi$
 $I = 638.000 / 1,73 \cdot 394 \cdot 0,92 = 1017 \text{ A}$
- La nouvelle *puissance réactive:*
 $Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi = 1,73 \cdot 394 \cdot 1017 \cdot 0,391 = 271 \text{ kVAr}$
ou $Q = Q_1 - Q_c = 511 - 240 = 271 \text{ kVAr}$.
- La nouvelle *puissance apparente :*
 $S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = 1,73 \cdot 394 \cdot 1017 = 693 \text{ kVA}$

Conclusion:

En ramenant le $\cos \varphi$ de 0,78 à 0,92 on déleste le transfo (le courant passe de 1200 A à 1017 A) et on libère ainsi une puissance de 125 kVA (818 kVA - 693 kVA) qui peut être utilisée pour fournir de l'énergie à d'autres utilisateurs.

8. Types de compensation

8.1. Compensation individuelle des transformateurs:

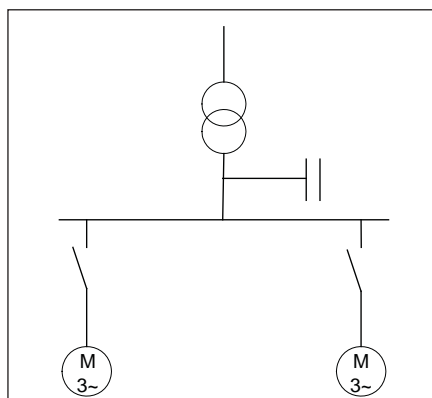


Fig. 8: Compensation individuelle du transfo

Dans beaucoup de cas, il faut prévoir une batterie de condensateurs fixe au secondaire du transformateur d'alimentation. Ce condensateur a comme but de compenser les pertes à vide réactive du transformateur. La puissance du condensateur ne peut donc pas être trop élevée.

Si la compagnie d'électricité compte une amende pour réseau capacitif, il faut veiller à ce que le condensateur fixe ne rende pas celui-ci capacitif lors des périodes d'activités réduites. La puissance réactive du condensateur ne peut être supérieure à celle de transfo.

Calcul de la puissance maximale du condensateur fixe:

exemple: Transfo: 630 kVA / 400 V / 50 Hz

$U_{prim.} = 15 \text{ kV} / I_0 = 1,5 \% / U_k = 4 \%$

Pertes cuivre = 1480 Watt / rendement (η) = 98,92 %

$$I_{prim} = \frac{P_{trafo}}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta} = \frac{630000}{\sqrt{3} \cdot 15000 \cdot 0,989} = 24,51 \text{ A}$$

$$I_{vide} = 1,5\% \cdot I_{prim} = 0,3676 \text{ A}$$

$$S_{vide} = \sqrt{3} \cdot U_{prim} \cdot I_{vide} = \sqrt{3} \cdot 15000 \cdot 0,3676 = 9539 \text{ VA}$$

$$P_{vide} = \text{pertes cuivre} = 1480 \text{ Watt}$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{vide}}{S_{vide}} = \frac{1480}{9539} = 0,1551$$

$$\varphi = \text{Arccos}(\cos \varphi) = \text{arccos}(0,1551) = 81^\circ$$

$$\text{Tg} \varphi = 6,369$$

$$\text{Tg} \varphi = \frac{Q_{cond}}{P_{vide}}$$

$$\Rightarrow Q_{cond} = \text{Tg} \varphi \cdot P_{vide} = 6,369 \cdot 1480 = 9,42 \text{ kVAr}$$

Le tableau 1 donne une indication pour les condensateurs à prévoir (transfo à pertes réduites).

Puissance transfo (kVA)	Puissance de compensation (kVAr)
100	2,5
160	2,5
200	2,5
250	5
315	5
400	5
500	6
630	10
800	10
1000	12,5
1250	15
1600	20
2000	25
2500	30

Tableau 1: Indication pour puissance de compensation pour les pertes à vide des transformateurs recent.

8.2. Compensation individuelle pour les moteurs asynchrones.

Sur chaque moteur, il y a un condensateur connecté en parallèle. La compensation de puissance réactive au moteur même allège la charge appliquée aux câbles d'alimentation du moteur.

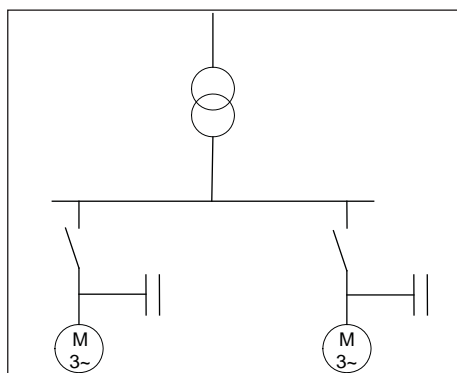


Fig. 9: Compensation individuelle de moteurs

Utilisation :

Pour moteurs de grosses puissances et de longues périodes d'utilisation. Pour câbles à la limite des dimensionnements et dont il faut compenser le courant réactif

Avantages:

- Le kVAr à prix économique
- Ne nécessite généralement pas d'unité de commutation
- Câbles de connections dépourvus de courant réactif \Rightarrow Pertes réduites dans les câbles.

Inconvénients:

- Coup d'installation élevé
- Pas toujours réalisable par manque d'espace au moteur
- Puissance à installer accrue à cause du facteur d'utilisation
- La décentralisation complique les travaux d'entretien

Calcul de la puissance de compensation :

Lors de la compensation individuelle de moteurs asynchrones, la puissance des condensateurs ne peut pas dépasser la puissance réactive à vide du moteur. La surcompensation risque de provoquer une autoexcitation du moteur quand celui-ci n'est plus alimenté et s'arrête. Par sécurité la puissance de compensation est limitée à 90% de la puissance réactive du moteur à vide.

$$Q_c = 0,9 \cdot I_0 \cdot U \cdot \sqrt{3}$$

Avec: Q_c : Puissance de compensation (kVAr)
 I_0 : Courant à vide du moteur (A)
 U : Tension nominale (V)

Exemple: Moteur 110 kW / 3000 tpm / 380 V

Cos phi à pleine charge = 0,85 / $I_{nom} = 197$ A

Courant à vide (I_0) :

- mesuré quand le moteur tourne à vide
- d'après la plaque signalétique du moteur
- estimé à 1/3 du courant nominal

$\Rightarrow I_0 = \pm 65,5$ A

Puissance de compensation (Q_c):

$$Q_c = 0,9 \cdot I_0 \cdot U \cdot \sqrt{3} = 0,9 \cdot 65,5 \cdot 380 \cdot \sqrt{3} = 39 \text{ kVAr} / 380 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$$

Quel sera le cos phi ?

$$\begin{aligned} \text{Avec: } Q_c &= P_a \cdot (T_g \varphi_1 - T_g \varphi_2) \Rightarrow T_g \varphi_2 = T_g \varphi_1 - (Q_c / P_a) \\ &= 0,619 - 39 / 110 = 0,264 \\ &\Rightarrow \text{Cos } \varphi_2 = 0,966 \end{aligned}$$

Dans certaines conditions de travail défavorables ou de charge partielle, le facteur de puissance (cos phi) peut rester inférieur à 0,9. Dans ce cas, une compensation par une batterie centralisée est requise.

8.3. Compensation par groupe

Si la plupart des utilisateurs sont simultanément en service, on peut les considérer comme un groupe avec un condensateur commun pour la compensation.

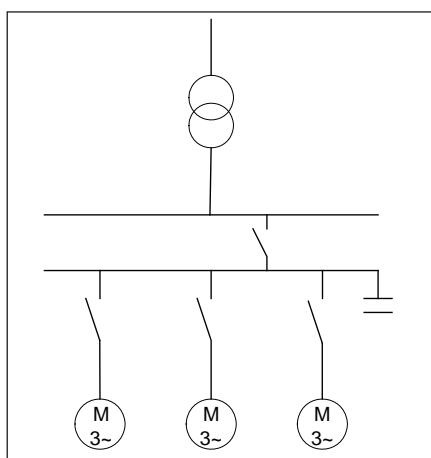


Fig. 10: Compensation par groupe

Utilisation:

Pour service simultané de plusieurs consommateurs inductifs.

Avantages :

- La charge du câble vers le groupe d'utilisateurs est allégée
- Coût au kVAr réduit

Inconvénients :

- Seulement applicable pour utilisateurs groupés

8.4. Compensation centralisée

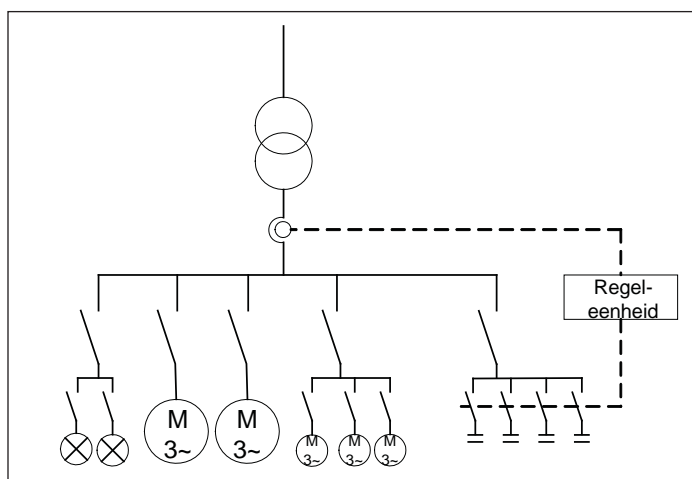


Fig. 11: Centrale compensatie

Les utilisateurs avec charge réactive fluctuante ne permettent pas de compensation fixe. Il n'est pas toujours économique ou il peut être dangereux de surcompenser. Ainsi il est nécessaire d'accorder la puissance du condensateur à celle de la charge réactive.

Pour cela il faut raccorder une compensation générale au point central de l'installation (p.e. à l'interrupteur principal).

La puissance du condensateur est divisée en gradins pilotés par un régulateur varmétrique en fonction de la demande de puissance réactive. La puissance réactive est donc compensée de façon optimale à tout moment.

Utilisation:

Applicable à toute installation.

Avantages :

- Un seul ensemble centralisé (facilite l'entretien)
- Coût d'installation réduit
- Puissance à installer réduite grâce au temps de travail non synchronisé des machines.
- Plus économique si des selfs-antiharmoniques sont requises
- Extensions faciles avec modules supplémentaires
- Optimisation du cos phi automatique.

Inconvénients:

- Coût élevé au kVAr
- Le réseau aval n'est pas déchargé de courant réactif.

9. Dimensionnement de batteries de condensateurs automatiques

En général on utilise des batteries de condensateurs pilotées automatiquement.

Pour la définition de la batterie il faut connaître la puissance consommée réactive et active.

Plusieurs cas peuvent se présenter:

9.1. Au stade de projet:

Dans ce cas, il n'y a encore aucune donnée de mesure disponible. En première approche, on peut estimer que les machines asynchrones ont un cos phi moyen de 0,75. Pour ramener ce cos phi à 0,9 , une batterie de condensateurs d'une puissance de 40% de la puissance active est souhaitable. Compte tenu du facteur de travail des différentes machines, on peut calculer la puissance de compensation comme suit:

$$Q_c = P \cdot g \cdot 0,4$$

Avec Q_c : Puissance de compensation
 P : Puissance active
 g : Coefficient d'utilisation

Exemple: $P = 600 \text{ kW}$ / $g = 0,7$

$$\Rightarrow Q_c = 600 \cdot 0,7 \cdot 0,4 = 168 \text{ kVAr}$$

9.2. Société déjà en activité

- **Enregistrement des puissances actives et réactives**

Cette méthode de calcul, est dans la pratique peu employée, car on ne dispose que rarement de mesures adéquates. Il faut veiller à ce que les mesures aient été effectuées sur une période assez longue afin d'éliminer les pointes de puissances. Il est conseillé d'étaler les mesures sur une semaine entière. On doit également tenir compte des fluctuations de charges sur l'année. Sur base des données de mesures ainsi obtenues une valeur représentative pour la puissance active et réactive peut être établie.

On trouve la puissance du condensateur à prévoir comme suit :

$$Q_c = P \cdot (T_g \varphi_1 - T_g \varphi_2) \\ = Q - (P \cdot T_g \varphi_2)$$

Avec: Q_c : Puissance du condensateur
 P : Puissance active mesuré
 Q : Puissance réactive mesuré
 $T_g \varphi_2$: Déduite du cos φ_2 souhaité

- A l'aide des factures mensuelles de la compagnie d'électricité.

Si on possède les factures mensuelles d'électricité on peut facilement calculer la puissance de la batterie de condensateurs. Ces factures mentionnent la puissance consommée active et réactive, la pointe de puissance active (kW) quart horaire et le cos phi (cos phi 1) dont on déduit la puissance de la batterie comme suit :

$$Q_c = (V_r - (V_a \cdot T_g \varphi_2)) / t \quad \text{ou}$$

$$Q_c = (P_a \cdot (T_g \varphi_1 - T_g \varphi_2))$$

Avec V_r : Consommation réactive (kVAh)

V_a : Consommation active (kWh)

t : Temps d'utilisation (h)

$T_g \varphi_1$: Déduit du cos φ_1 actuel

$T_g \varphi_2$: Déduit du cos φ_2 souhaité

La puissance du condensateur calculée de cette façon représente une valeur moyenne pour un mois. Afin d'obtenir un calcul exact, couvrant les fluctuations sur une année il est recommandé d'effectuer ce calcul à l'aide de plusieurs factures mensuelles.

10. Compensation dans des réseaux comportant des harmoniques

10.1. Introduction:

Dans les réseaux basse et moyenne tension, il n'y a pas seulement des courants à 50 Hz présents, mais on trouve également des courants et tensions de fréquences de rangs plus élevés. Ces hautes fréquences ou harmoniques, qui sont générées par des charges non-linéaires, peuvent surcharger et endommager des équipements électroniques sensibles. Le plus souvent on ne se rend compte de la présence des harmoniques perturbateurs que lorsqu'il se produit des dysfonctionnements d'appareillages électriques. Ces derniers peuvent induire de coûteux arrêts de production ou des réparations onéreuses.

Charges linéaires

Avec une charge linéaire, une tension sinusoïdale va s'installer et un courant de forme sinusoïdale va circuler, avec ou sans déphasage.

Charges non linéaires

En revanche, les charges non-linéaires induisent malgré l'installation d'une tension sinusoïdale, un courant non-sinusoïdal.

Comme charge non linéaire, nous avons:

- Variateurs de fréquence
- Régulateur à courant continu
- Ordinateurs, téléviseurs
- Fours à induction
- Alimentation de secours
- Eclairage économique et lampes à décharges
- Variateurs de lumière

10.2. Comment les tensions harmoniques sont-elles générées ?

Les courants non sinusoïdaux, absorbés par les charges non linéaires, vont provoquer sur l'impédance du réseau une chute de tension et entraîner une déformation de la tension qui n'est alors plus sinusoïdale à 100%. D'après l'analyse de Fourier, l'onde résiduelle est composée d'une fondamentale (f_1) et d'une série d'ondes dont les fréquences sont des multiples entiers de celle de la fondamentale ($f_v = v \cdot f_1$).

L'onde de base ou fondamentale a la même fréquence que celle du réseau (chez nous = 50 Hz).

Les ondes de fréquences supérieures se dénomment harmoniques. L'harmonique v a donc une fréquence de $v \cdot 50$ Hz.

Exemple:

le 5-ième harmonique (H5) à une fréquence de 250 Hz.

le 7-ième harmonique (H7) à une fréquence de 350 Hz.

On mesure des taux d'harmoniques importants, principalement dans les industries où l'on trouve un grand nombre de charges non linéaires. Il n'y a pas que les industries qui polluent la tension du réseau. Les appareils domestiques, comme les téléviseurs et les ordinateurs, produisent également des harmoniques.

Le taux d'harmoniques est fonction du type de charge non-linéaire et du pourcentage de charges non-linéaires sur le même transfo.

Exemple :

Les courants harmoniques générés par la commutation des thyristores, d'un redresseur triphasé idéal sont de l'ordre de :

$$v = k.p \pm 1$$

Avec: v : le rang de l'harmonique

p : le nombre d'impulsions du redresseur

$k = 1, 2, 3, \dots$

Un redresseur idéal à 6-impulsions ($p=6$) créera des harmoniques de rang :

$\Rightarrow v = 5$ et 7 pour $k = 1$

$\Rightarrow v = 11$ et 13 pour $k = 2$

$\Rightarrow v = 17$ et 19 pour $k = 3$

$\Rightarrow \dots$

La grandeur d'une harmonique générée est proportionnelle à l'inverse du rang :

$$I_v = I_1 / v$$

Avec: I_1 : la valeur efficace du courant fondamental

n : le rang de l'harmonique

I_v : la grandeur du v -ième harmonique

Remarque :

Il convient de remarquer que les valeurs précédentes sont des valeurs théoriques. Dans la pratique on trouve souvent des valeurs différentes à cause des composants non idéals.

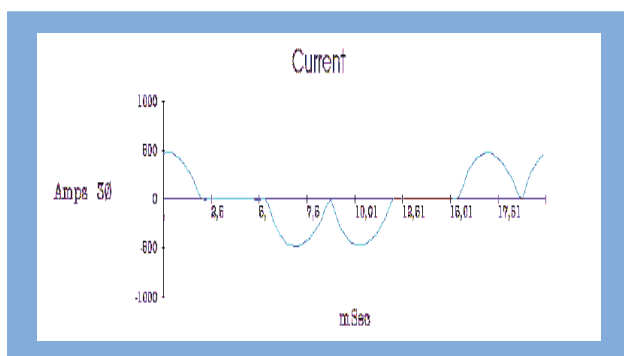


Fig 12 : Courant primaire d'un moteur à courant continu.

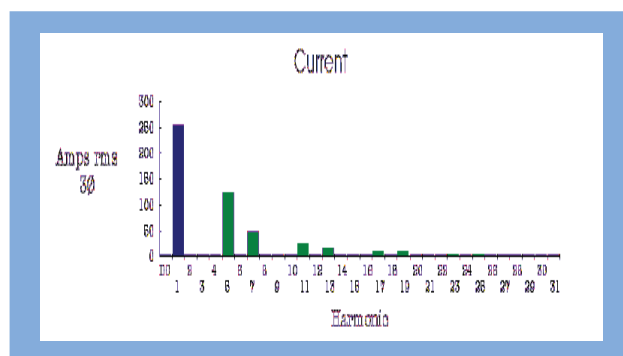


Fig 13 : Composition d'harmoniques du courant primaire.

Les chutes de tension sur les bobines du transfo dues aux courants harmoniques sont fonction de la grandeur des courants non-linéaires et de l'impédance du réseau.

En cas d'un grand nombre de différentes charges non linéaires, plusieurs harmoniques peuvent se neutraliser partiellement. Dans ce cas la distorsion de la tension sera inférieure à la distorsion de la tension obtenue par une grande charge non-linéaire seule.

Plus l'impédance du réseau est faible (ex. plus grand transfo), de plus la distorsion de tension est petite, pour un même taux de courant harmoniques.

En combinant deux transformateurs avec couplages de bobines différents on arrive également à neutraliser les courants harmoniques, générés par un pont de redresseur sur le premier transfo, par les courants harmoniques générés sur le deuxième transfo.

11. Influence des condensateurs sur des réseaux comportant des harmoniques.

Lorsqu'on installe des condensateurs sur un transfo, qui principalement est une self, on crée un circuit de résonance LC.

11.1. Résonance parallèle

Se manifeste lors de l'installation d'une batterie de condensateurs standard (sans selfs)

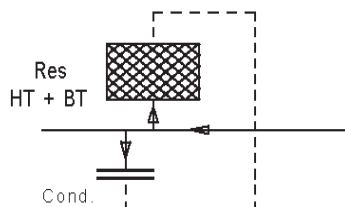


Fig. 14: Schéma résonance parallèle

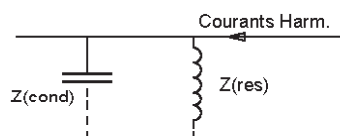


Fig. 15: Schéma équivalent

Vu du point de raccordement de la batterie de condensateurs, l'impédance équivalente est formée par le couplage en parallèle de l'impédance du réseau amont et de la batterie:

$$Z(eq) = \frac{Z(res) \times Z(cond)}{Z(res) + Z(cond)}$$

Avec : $Z(res)$: Impédance du réseau amont
 $Z(cond)$: Impédance des condensateurs

L'impédance équivalente en fonction de la fréquence pour différentes valeurs de S_k , est comme suit :

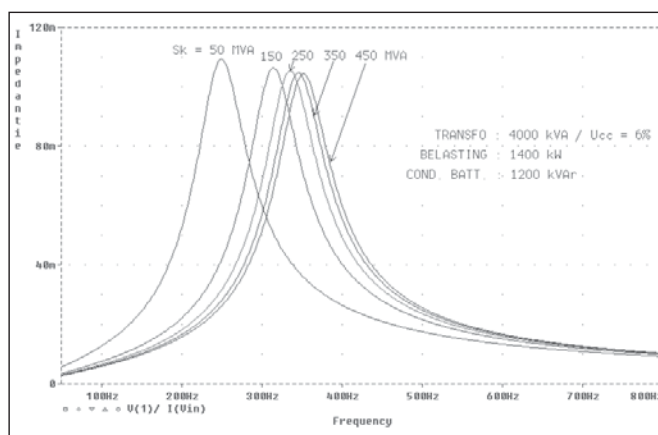


Fig. 16: L'impédance du réseau pour différentes valeurs de S_k . (Résonance parallèle)

La formule précédente nous montre que pour une fréquence spécifique l'impédance équivalente devient théoriquement infinie quand : $Z(res) = -Z(cond)$

Si l'on considère l'impédance du réseau amont comme pure selfique, on peut dire que $Z(res) = -Z(cond)$ est égale à :

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L(res) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C(cond))$$

La fréquence de résonance devient :

$$(1) \quad f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L(res) \cdot C(cond)})$$

La fréquence de résonance parallèle exacte, est difficile à déterminer. Elle est notamment fonction de l'impédance du réseau amont ($L(res)$) qui à son tour est fonction du courant de court-circuit au point de raccordement.

La puissance de court-circuit :

$$S_k = U^2 / (2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot L(\text{res}))$$

Avec: f_0 : la fréquence fondamentale

S_k : puissance de court-circuit.

Puissance réactive de la batterie de condensateurs :

$$Q_c = U^2 \cdot \omega \cdot C(\text{cond}) = U^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot C(\text{cond})$$

Avec ces équations, l'équation (1) devient :

$$f = f_0 \cdot \sqrt{ (S_k / Q_c) } \quad \text{ou}$$

$$n = f / f_0 = \sqrt{ (S_k / Q_c) }$$

Une batterie de 5 MVAR provoquera une résonance pour l'harmonique avec rang :

$$N = 5 \text{ si } S_k = 125 \text{ MVA}$$

$$N = 7 \text{ si } S_k = 245 \text{ MVA}$$

La fréquence de résonance parallèle dépend donc de l'exploitation du réseau :

La charge sur le réseau

($S_k \text{ min} \dots S_k \dots S_k \text{ max}$)

Le nombre de transformateurs en parallèle

....

La fig. 16 nous montre que le pic de résonance n'est pas infini. En réalité le pic est limité par l'effet d'amortissement des résistances du réseau, qui ont été négligées dans ce calcul.

Néanmoins, la résonance parallèle reste dangereuse, et ne peut pas être perdue de vue.

11.2 Résonance série (condensateurs avec selfs série)

Cette résonance paraît lors de l'installation de batteries de condensateurs avec selfs.

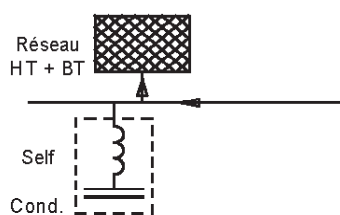


Fig. 17 : Schéma résonance série

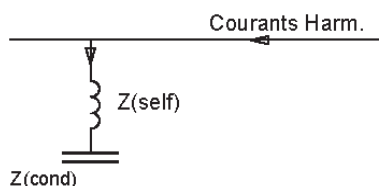


Fig. 18 : Schéma équivalent

L'impédance totale de l'ensemble (condensateur – self) est formée par le branchement du condensateur et la self en série.

$$Z(\text{eq}) = Z(\text{cond}) + Z(\text{sp})$$

Pour une fréquence spécifique l'impédance équivalente est de zéro. Cette fréquence est la **fréquence d'accord** du filtre.

La Fig. 19 montre la courbe d'impédance du filtre (cond. – self). Il s'agit d'un filtre avec fréquence d'accord de 189 Hz.

A la fréquence d'accord nous avons:

$$Z(\text{eq}) = 0$$

$$\text{Ou : } Z(\text{self}) = - Z(\text{cond})$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L(\text{self}) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C(\text{cond}))$$

De là:

$$f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{ L(\text{sp}) \cdot C(\text{cond}) })$$

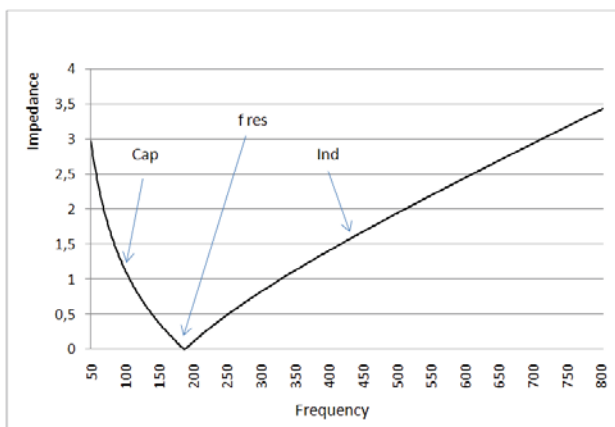


Fig. 19: Impédance du filtre en fonction de la fréquence (Résonance série)

Pour des fréquences inférieure à la fréquence d'accord l'impédance du filtre est **capacitive**.

Pour des fréquences au-delà de la fréquence d'accord l'impédance du filtre est **inductive**.

En théorie, à la fréquence d'accord, l'impédance est de zéro.

D'éventuels courants harmoniques avec une telle fréquence seront entièrement absorbés par le filtre. Il va de soi que l'on en tient compte dans le dimensionnement du filtre.

Dans la pratique, l'impédance est limitée vers le bas par la résistance de self, qui est fonction de la qualité (Q) de la self.

11.3. Anti-résonance (condensateurs avec selfs-séries)

Là où les harmoniques de fréquences supérieures à la fréquence d'accord sont absorbés, on peut avoir des amplifications pour des harmoniques de fréquence inférieures à la fréquence d'accord. Ceci est dû au phénomène **d'antirésonance**, qui représente la résonance entre le filtre et le réseau en amont.

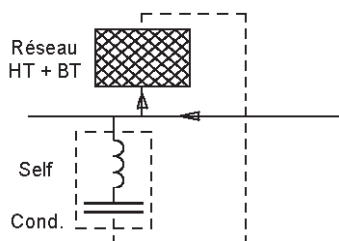


Fig. 20: Schéma d'antirésonance

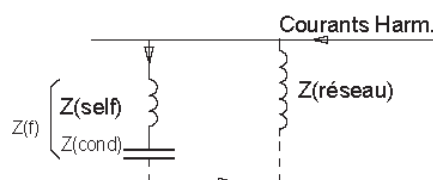


Fig. 21 : Schéma équivalent d'antirésonance

Vue à partir du jeu de barres la résistance équivalente est :

$$Z(eq) = \frac{Z(net) \times Z(f)}{Z(net) + Z(f)}$$

La résistance équivalente est infinie si :

$$Z(res) + Z(f) = 0$$

avec: $Z(f) = Z(cond) + Z(self)$ ce qui résulte en:

$$Z(res) + Z(cond) + Z(self) = 0$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L(res) + L(self)) = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f \cdot C(cond))$$

Ou :

$$f = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L(res) + L(self)) \cdot C(cond)})$$

Comparée à l'expression pour la résonance série, on voit que la fréquence d'antirésonance est toujours inférieure à la fréquence d'accord du filtre.

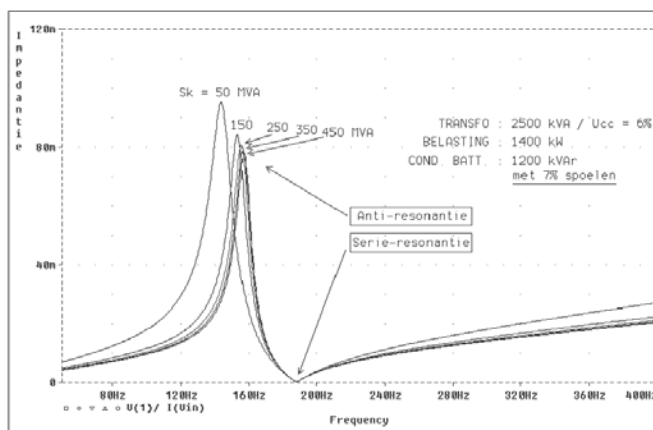


Fig. 22: Antirésonance et résonance série pour différentes puissances de court-circuit du réseau en amont.

12. Batteries de condensateurs avec ou sans selfs séries?

12.1 Réseaux sans condensateurs.

Soit le réseau suivant:

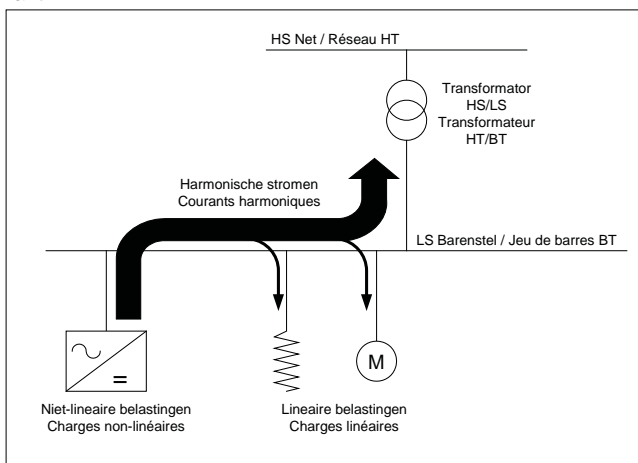


Fig. 23: Réseau sans condensateurs.

Les courants harmoniques, générés par les charges non-linéaires, vont faire apparaître aux bornes des impédances du réseau (câbles, transfo's, réseau H.T....) des tensions, entraînant une déformation de la tension 50 Hz. Vue par les courants harmoniques, l'impédance du réseau varie en fonction de la fréquence, comme indiqué en fig 24. Cette impédance de base sera d'autant plus importante que la puissance de court-circuit du réseau sera faible. A courants harmoniques constants, les tensions harmoniques induites le seront donc aussi. La situation peut devenir critique lorsque le réseau électrique comporte des condensateurs.

12.2 Réseaux comportant des batteries de condensateurs

Le placement d'une batterie de condensateurs standard a une influence importante sur l'amplification des harmoniques du réseau électrique. La présence de condensateurs entraîne une résonance (voir 11.1 Résonance parallèle) entre la self du transformateur (+réseau) et les capacités des batteries de condensateurs. A certaines fréquences on observe une augmentation de l'impédance du réseau (voir fig 24),

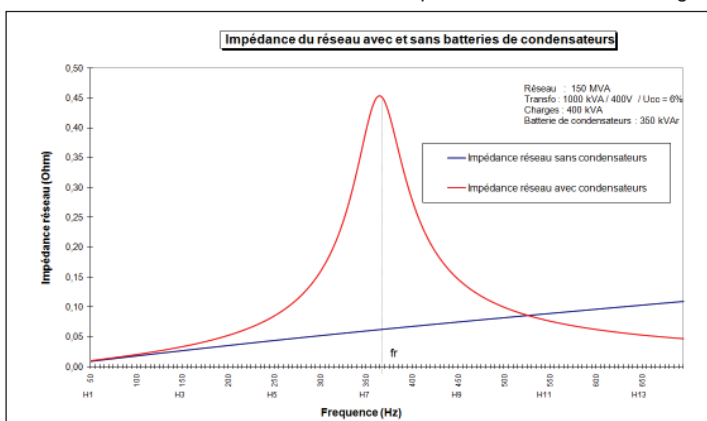


Fig. 24: Impédance du réseau avec et sans condensateurs.

dont on trouve le maximum à la fréquence de résonance (f_r). Celle-ci est fonction des caractéristiques du transformateur et de la batterie de condensateurs. L'amplitude de ce maximum n'est limitée que par les résistances (R) des charges linéaires et des lignes.

(voir résonance parallèle)

Certains courants harmoniques générés, vont dans cette situation d'impédance de réseau élevé, induire des tensions harmoniques supérieures à celles rencontrées dans un réseau dépourvu de système de compensation. Des surtensions dangereuses peuvent être observées si la fréquence de résonance est quasi celle d'un courant harmonique présent, avec comme conséquences, des dégâts possibles aux appareillages électriques et à la batterie de condensateurs. Ce phénomène de résonance s'explique comme suit: Les courants harmoniques des charges non-linéaires génèrent des tensions harmoniques. Les tensions harmoniques vont à leur tour créer des courants harmoniques dans la batterie de condensateurs qui s'ajoutent avec les courants harmoniques des charges non-linéaires (voir fig 25). Par conséquent les tensions harmoniques augmentent à leur tour entraînant à nouveau une augmentation de courants harmoniques. un emballement se produit. Un équilibre (max.) est atteint par la résistance du réseau.

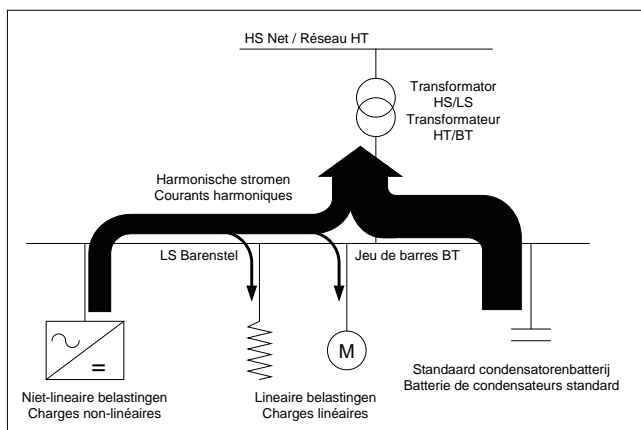


Fig. 25: Réseau avec batterie de condensateurs standard.

Avec les batteries de condensateurs automatiques, la puissance réactive enclenchée est variable. A chaque enclenchement ou déclenchement d'un étage de condensateurs, la fréquence de résonance change également. Lorsqu'on ne fait pas une analyse correcte d'un réseau comportant des harmoniques lors de l'installation d'une batterie de condensateurs standard, les probabilités d'apparition de tensions amplifiées destructrices sont donc réelles.

12.3 Réseaux comportant des batteries de condensateurs avec selfs-série

Si chaque étage de condensateurs est pourvu d'une self- série, l'impédance du réseau sera modifiée comme suit:

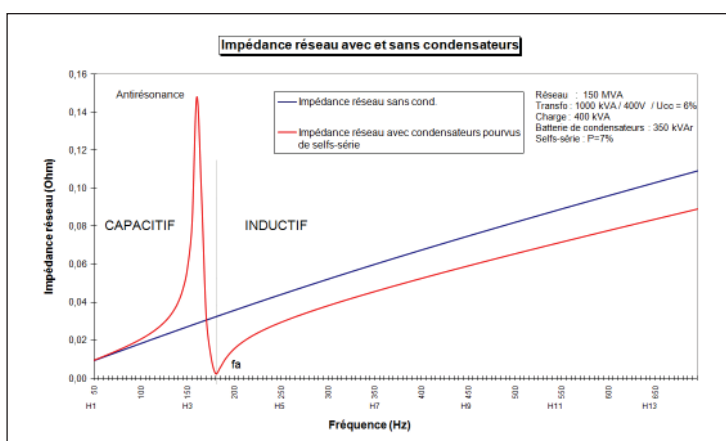


Fig. 26: Impédance du réseau avec condensateurs (pourvus de selfs) et sans condensateurs.

Pour une fréquence bien précise l'impédance sera quasi nulle. Cette fréquence est nommée fréquence d'accord (f_a). Un courant harmonique d'une telle fréquence sera presque complètement absorbé par la batterie de condensateurs (filtre passif). Pour des fréquences au delà de la fréquence d'accord, le réseau devient inductif. L'impédance du réseau est également plus basse que dans un réseau sans condensateurs. Une partie des courants harmoniques sera absorbée par le filtre et ne circulera plus dans le réseau (voir fig 27).

Par conséquent le taux de pollution du réseau en sera diminué d'autant.

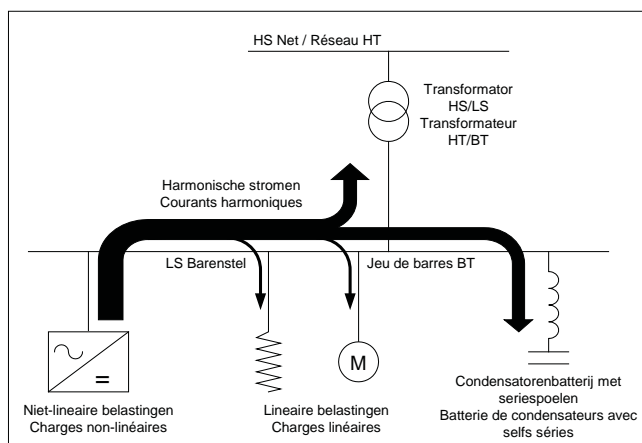


Fig. 27: Réseau avec condensateurs pourvue de selfs antiharmoniques.

Le type du filtre déterminera le nombre et le rang de chaque harmonique absorbée. Le choix dépend du taux de pollution, du résultat à obtenir et de la téléfréquence dans la région (pour la commande, entre autres, de compteurs jour-nuit). Il est évident que ces signaux, injectés dans le réseau électrique par le distributeur, ne peuvent être perturbés par la batterie avec selfs-série.

Pour des harmoniques de fréquences plus basses que la fréquence d'accord, des surtensions plus ou moins importantes restent possibles. Ceci est dû au phénomène d'antirésonance. Lors du dimensionnement du filtre, on doit veiller à ce que la fréquence d'antirésonance ne soit pas celle d'une harmonique significativement présente.

13. Batteries de condensateurs avec selfs série en pratique

13.1 Facteur de blocage

Les selfs sont caractérisés par le facteur de blocage qui représente le rapport de l'impédance de la self sur l'impédance de condensateur.

$$p (\%) = \frac{X_l}{X_c}$$

En pratique nous distinguons des facteurs de blocage de:

5.6 - 7 - 8 - 12.5 - 13 et 14 %.

Des selfs-séries au même facteur de blocage, auront, en combinaison avec leurs condensateurs, la même fréquence d'accord. (voir tableau si dessous).

En plaçant une self en série devant le condensateur on obtient une augmentation de la tension sur le condensateur. La chute de tension sur la self parcouru par un courant capacitif s'additionne notamment avec la tension du réseau.

Par conséquent il est nécessaire d'utiliser des condensateurs de tension nominale élevée s'ils sont utilisés en combinaison avec des de selfs-séries. L'augmentation de la tension sur le condensateur en fonction de la self est repris dans le tableau 2 si dessous.

Fact. de blocage P(%)	Fréquence d'accord (Hz)	Tension sur le cond. à réseau 400V
5,67	210	424
7	189	430
8	177	435
12,5	141	457
13	139	460
14	134	465

Tableau 2: Influence du facteur de blocage sur la tension aux bornes des condensateurs.

13.2 Influence des signaux pour télécommande centralisé

Pour des batteries de condensateurs avec selfs-séries, l'impédance du réseau est très faible pour des fréquences proche à la fréquence d'accord. L'exemple ci-dessous montre l'impédance du réseau vue par le point d'injection des signaux de télécommande. La courbe est fonction des caractéristiques du transformateur, de la batterie de condensateurs et de la charge.

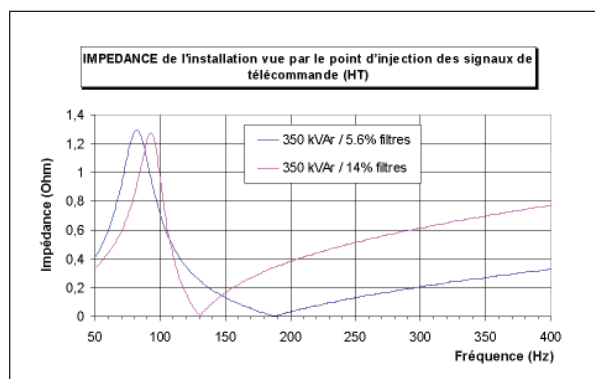


Fig. 28: Influence de batteries avec selfs sur l'impédance du réseau vue par le point d'injection des signaux de télécommande.

Par sommation de l'impédance du transformateur et de la batterie de condensateurs la fréquence d'accord de l'ensemble (transfo+cond.) est inférieure à celle de la batterie. Une batterie avec fréquence d'accord supérieure à la fréquence du signal de télécommande peut en combinaison avec en transformateur devenir très ennuyeux pour le signal de télécommande. Le graphique montre que l'impédance de l'ensemble (batterie avec selfs à 5.6% (fréquence d'accord = 210 Hz) et transformateur HT) est très faible pour le signal de télécommande de 180 Hz. Ce dernier sera donc absorbé par l'installation.

Dans le choix des selfs antiharmoniques ont doit tenir compte de la présence de ces signaux de télécommande.

Pour ne pas perturber les signaux de télécommande il vaut mieux se tenir aux règles suivants :

Fréquence de télécommande (Hz)	Facteur de blocage des selfs
< 250 Hz	P >= 14%
250 - 350 Hz	P >= 7%
> 350 Hz	P >= 5,6%

Tableau 3: Influence de la fréquence de télécommande sur le choix des selfs.

13.3 Circuits bouchons pour fréquence de télécommande.

L'installation de batteries de condensateurs sans selfs permet également d'obtenir une impédance faible pour la fréquence de télécommande présente. Dans ce cas il faut installer un filtre bouchon à l'entrée de la batterie de condensateurs pour éviter l'absorption du signal de télécommande.

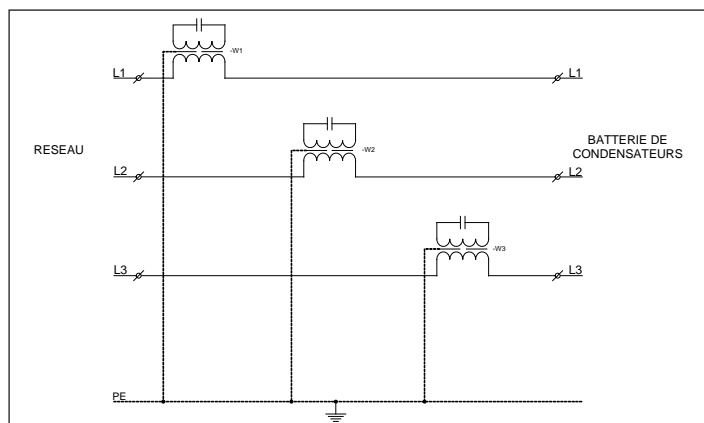


Fig. 29: Circuit bouchon pour batteries de condensateurs.

Dans la région d'Anvers la fréquence de télécommande est de 1350 Hz. Pour cette fréquence l'impédance de la batterie de condensateurs est très faible.

L'impédance est notamment:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (X_c \text{ descend si la fréquence augmente})$$

Lorsqu'on installe une batterie de condensateurs standard dans cette région, on est obligé d'installer un circuit bouchon à l'entrée de la batterie. Pour des batteries avec selfs-séries (antiharmoniques) il ne faut plus de circuit bouchon.