

Les fiches techniques

53

La modulation d'énergie La compensation d'énergie réactive



53 Compensation de la puissance réactive – Filtre associé

53.1 Généralités

Un système électrique alimenté par une tension alternative sinusoïdale met en jeu deux formes d'énergie :

- l'énergie active qui correspond à la puissance active P (W). Cette énergie est transformée en énergie mécanique, thermique, lumineuse ;

- l'énergie réactive qui correspond à la puissance réactive Q (var) Cette énergie sert à la création des champs magnétiques.

En régime alternatif sinusoïdal, on définit le facteur de puissance par :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser les choix techniques et économiques relatifs à une installation : réduire la section des conducteurs, diminuer les pertes et réduire la chute de tension en ligne, augmenter la puissance disponible. La puissance réactive Q_L de l'installation (généralement de nature inductive : moteur, transformateur) doit être réduite.

- On améliore le facteur de puissance à l'aide de condensateurs, d'où le terme *compensation de la puissance réactive*.

L'installation d'une batterie de condensateurs de puissance Q_C diminue la puissance réactive totale :

$$Q_t = Q_L - Q_C$$

$$Q_C = P \times (\tan \varphi - \tan \varphi')$$

En triphasé : $S = U \times \sqrt{3} \times I$ et $S' = U \times \sqrt{3} \times I'$.

Constatations

$I' < I$ donc le courant en ligne est diminué ainsi que les pertes en ligne.

L'installation de condensateurs permet à l'abonné en *tarif vert* EDF (puissance souscrite supérieure à 250 kVA) de diminuer sa facture en évitant la consommation d'énergie réactive au-delà de la franchise allouée par le distributeur.

La facturation se réfère à :

$$\tan \varphi = \frac{Q}{P} = \frac{W_r}{W_a}$$

Application numérique

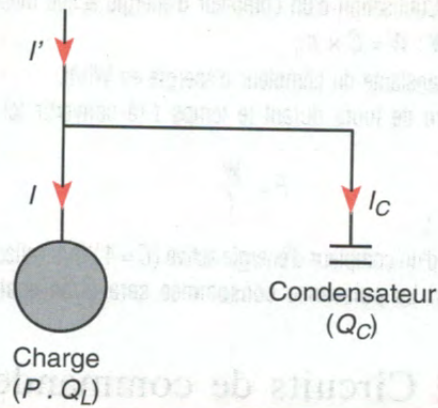
Un moteur asynchrone triphasé alimenté par un réseau triphasé 3×400 V absorbe au point de fonctionnement nominal une puissance électrique de 100 kW avec un $\cos \varphi_{\text{moteur}} = 0,75$. On désire relever le facteur de puissance de l'installation à la valeur $\cos \varphi' = 0,93$.

Solution

Calcul de la puissance de la batterie de condensateurs :

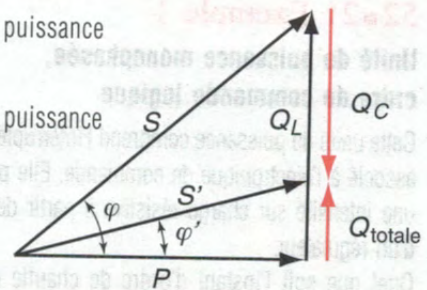
$\cos \varphi_{\text{moteur}} = 0,75$ alors $\tan \varphi_{\text{moteur}} = 0,881$. $\cos \varphi' = 0,93$ alors $\tan \varphi' = 0,395$. $Q_C = 100 \times (0,881 - 0,395) = 4,6$ kvar.

$I_{\text{moteur}} = 192$ A. I' installation avec les condensateurs. $I' = 155$ A.

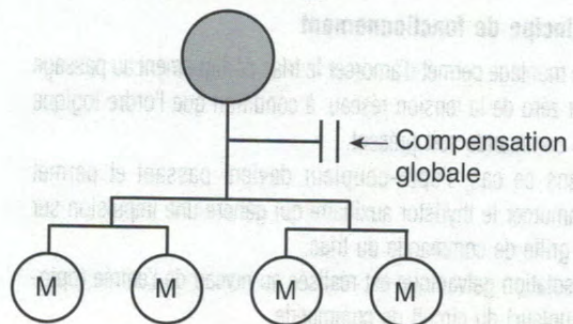


$\cos \varphi$: facteur de puissance avant compensation.

$\cos \varphi'$: facteur de puissance après compensation.



Source d'énergie



Au point de livraison, le distributeur d'énergie fournit gratuitement l'énergie réactive jusqu'à concurrence de 40 % de l'énergie active consommée ($\tan \varphi = 0,4$) pendant au maximum 16 heures par jour (entre 6 heures et 22 heures), pendant les heures de pointes fixes, les heures de pointes mobiles et les heures pleines d'hiver (1^{er} novembre au 31 mars), sans limitation pendant les heures creuses d'hiver et pendant la totalité des heures des mois d'avril à octobre.

Pendant les périodes soumises à limitation, l'énergie réactive consommée au-delà de $\tan \varphi = 0,4$ est facturée mensuellement au tarif mentionné dans les barèmes de prix en vigueur.

Si la valeur de la tangente φ est supérieure à 0,4, il faut envisager d'abaisser à cette valeur par l'utilisation de condensateurs.

La compensation peut être *globale* (en tête de l'installation), *partielle* (par groupes de récepteurs), *individuelle ou locale* (pour chaque récepteur inductif).

Les batteries de condensateurs sont branchées en parallèle sur le réseau.

Ces batteries peuvent être fixes ou fractionnées (mode de compensation en gradins).

Cela permet une régulation pas à pas de la puissance réactive.

Remarque

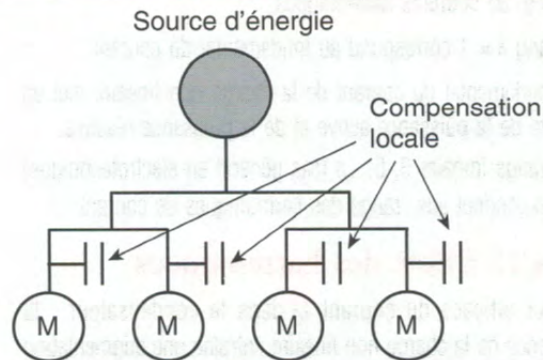
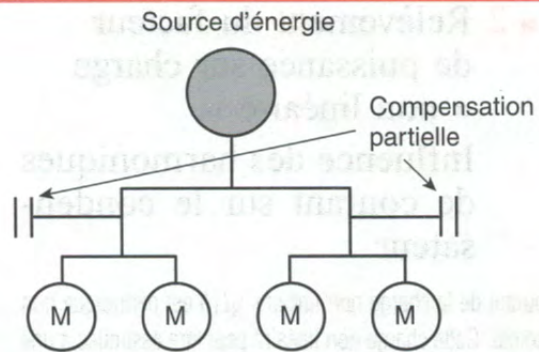
La mise sous tension de batteries de condensateurs s'accompagne de régimes transitoires caractérisés par une pointe de courant.

■ En *tarif jaune*, l'énergie réactive n'est pas comptabilisée mais elle est prise en compte dans la puissance apparente (kVA), puissance souscrite par l'abonné, sur laquelle est basé l'abonnement.

cos φ supposé	0,5	0,6	0,7	0,75	0,8
Q_C /Puissance souscrite	0,7	0,6	0,5	0,4	0,35
Gain en puissance souscrite	0,47	0,36	0,25	0,20	0,15
Gain en puissance active/Puissance souscrite	0,24	0,22	0,17	0,15	0,12

D'après Alpes Technologies.

Ces valeurs sont définies pour un facteur de puissance après compensation de 0,95.



L'installation de condensateurs permet à l'abonné :

- soit de diminuer sa puissance souscrite ;
- soit de disposer d'une puissance active supplémentaire sans modifier son contrat ;
- soit d'augmenter la puissance active disponible.

■ **Exemple d'illustration**

Un abonné a souscrit un contrat de 50 kVA. Son facteur de puissance est estimé à 0,6.

Il souhaite réaliser une extension de son installation.

Q_C à installer : 30 kvar
 Puissance active actuelle : 30 kW
 Gain en puissance apparente : 18 kVA
 Vérification : $S = P / \cos \varphi$.
 Puissance apparente si $\cos \varphi = 0,6$: 50 kVA
 Puissance active si $\cos \varphi = 0,95$: 31,5 kVA
 Gain : + 18 kVA donc 36 %

Classe de température

- Fonctionnement - 10 / + 45 °C (moyenne sur 24 h : 40 °C).
- Stockage - 30 °C / + 60 °C.
- Tension nominale 400 V - 50 Hz triphasé.
- Ensemble câblé en armoire IP315 avec disjoncteur intégré.
- Équipement livré prêt à raccorder et destiné à la compensation des systèmes de petites et moyennes puissances.

53 ■ 2 Relèvement du facteur de puissance sur charge « non linéaire ».

Influence des harmoniques de courant sur le condensateur

Le courant de la charge non linéaire $i_N L(t)$ est périodique non sinusoïdal. Cette charge non linéaire peut être assimilée à une source de courants harmoniques.

Le rang $k = 1$ correspond au fondamental du courant.

Le fondamental du courant de la charge non linéaire met en œuvre de la puissance active et de la puissance réactive.

Les rangs impairs 3, 5... n (cas général en électrotechnique) correspondent aux rangs des harmoniques de courant.

53 ■ 21 Effets des harmoniques

Valeur efficace du courant I_C dans le condensateur : la présence de la charge non linéaire entraîne une augmentation de la valeur efficace du courant traversant le condensateur pouvant lui être préjudiciable.

Les condensateurs sont généralement dimensionnés pour ne pas dépasser :

$$1,1 \times U_n \text{ et } 1,3 \times I_n.$$

Remarque

■ La résonance parallèle du circuit « $L_{\text{ligne}} - C$ » est obtenue pour $X_{\text{ligne}} = X_C$ soit :

$$L_{\text{ligne}} \times k_r \times \omega = \frac{1}{C \times k_r \times \omega}$$

À la résonance parallèle, $Z_{\text{eq}}(k)$ devient théoriquement infinie. Néanmoins, cette impédance est limitée par l'impédance de la charge linéaire.

Si l'harmonique de rang k_r existe, l'intensité $I_C(k)$ peut devenir importante, d'où le risque d'endommager le condensateur. Il faut donc éviter d'avoir un rang k tel que :

$$\omega_1 < k \times \omega < \omega_2.$$

C'est le rôle de l'inductance antiharmonique L_{ah} .

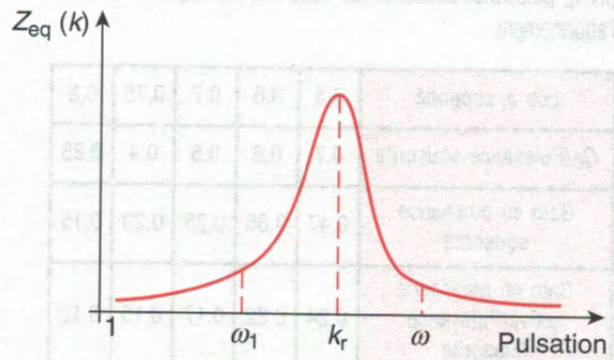
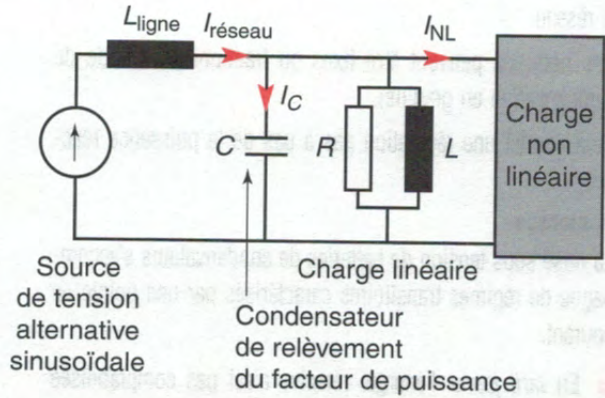
Il faut abaisser l'impédance Z_{eq} pour les fréquences correspondantes aux fréquences des courants harmoniques.

On ajoute en série avec le condensateur une self dite antiharmonique : l'ensemble « $L_{\text{ah}} - C$ » série doit présenter un comportement inductif pour tous les harmoniques créés par la charge non linéaire.

COMPENSATION FIXE PAR BATTERIE DE CONDENSATEURS

Puissance nominale (kvar)	Pouvoir coupure disjoncteur (kA)	Dimensions $L \times P \times H$ (mm)	Poids (kg)
10	10	190 × 230 × 380	5
15	10	190 × 230 × 380	5
20	10	190 × 230 × 380	5
25	10	190 × 230 × 380	10
30	10	190 × 230 × 380	10
40	16	365 × 230 × 380	12
50	16	365 × 230 × 380	15
60	16	365 × 230 × 380	15

D'après Alpes Technologies.



Z_{eq} : Impédance équivalente du circuit « vue » de la source :

$$k_r \times \omega = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{ligne}} \times C}}$$

On distingue :

- la *résonance série* de la branche série « $L_{ah} - C$ » :

$$\omega_{série} = \frac{1}{\sqrt{L_{ah} \times C}}$$

- la *résonance parallèle* (ou antirésonance) de l'ensemble $L_{ligne} L_{ah} - C$:

$$\omega_{ar} = \frac{1}{\sqrt{(L_{ligne} + L_{ah}) \times C}}$$

53 ■ 3 Filtre passif

La propagation des courants harmoniques générés par la charge non linéaire peut être *arrêtée* grâce à des filtres passifs dont le fonctionnement est basé sur le phénomène de résonance série.

On place en parallèle sur la charge polluante un ou plusieurs filtres résonants *série* chacun accordé sur le rang harmonique à *piéger*.

Chaque filtre résonant présente une impédance très faible pour un rang harmonique déterminé.

Les courants harmoniques se referment dans ces filtres d'impédance très faibles et ne se propagent plus sur le réseau.

- Ces filtres résonants présentent l'inconvénient d'être sensibles aux variations de l'inductance dues à la qualité de la réalisation, ou de la capacité (vieillesse, température).

Fréquence de résonance d'un filtre :

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

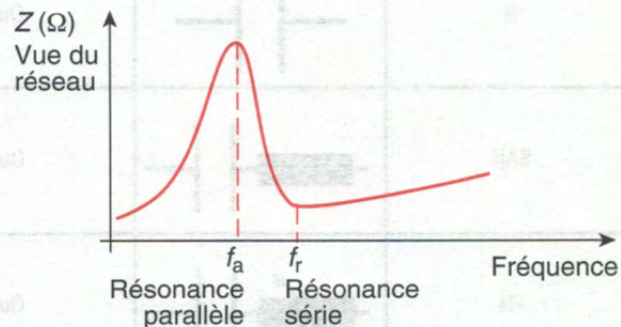
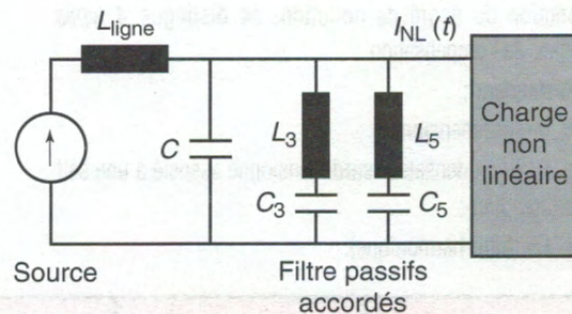
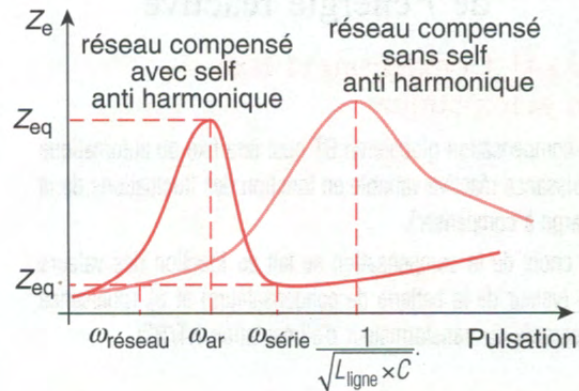
Pour le filtre accordé sur le rang 3 :

$$f_r = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L_3 \times C_3}} = 3 \times f_{réseau}$$

Remarques

- À la fréquence de résonance du filtre, l'impédance vue du réseau est faible.
- À une fréquence inférieure, on observe un accroissement de l'impédance vue du réseau. Cet accroissement est dû à la résonance parallèle avec l'inductance L_{ligne} . On observe une antirésonance notée par :

$$f_{ar} = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{(L_{ligne} + L_{filtre}) \times C}}$$



53 ■ 4 Choix du système de compensation de l'énergie réactive

53 ■ 41 Compensation fixe ou automatique

La compensation globale en BT peut être fixe ou automatique (puissance réactive variable en fonction des fluctuations de la charge à compenser).

Le choix de la compensation se fait en fonction des valeurs Q_C (valeur de la batterie de condensateurs) et S_n (puissance apparente du transformateur d'alimentation HT/BT).

53 ■ 42 Choix du type de compensation

Le choix du type de compensation dépend de la présence ou non de courants harmoniques sur le réseau.

Selon l'importance des générateurs d'harmoniques (convertisseurs, fours à arc, tubes fluorescents...) on dit que le réseau est pollué ou fortement pollué.

En fonction du degré de pollution, on distingue 4 types possibles de compensation :

- type standard ;
- type *H* (surdimensionné) ;
- type *SAH* (condensateur surdimensionné associé à une self antiharmonique) ;
- type *FH* (filtre harmonique).

On définit :

- S_h : puissance des générateurs harmoniques présents au secondaire du transformateur d'alimentation ;

- S_n : puissance apparente du transformateur d'alimentation.

$\frac{S_h}{S_n} \leq 15 \%$	Type standard
$15 \% \leq \frac{S_h}{S_n} \leq 25 \%$	Type H
$25 \% \leq \frac{S_h}{S_n} \leq 60 \%$	Type SAH
$\frac{S_h}{S_n} > 60 \%$	Type FH

$\frac{Q_C}{S_n} \leq 15 \%$	Compensation fixe
$\frac{Q_C}{S_n} > 15 \%$	Compensation automatique

Exemples

- $Q_C = 16$ kvar ; $S_n = 160$ kVA
 $Q_C / S_n = 10 \%$: compensation fixe.
- $Q_C = 32$ kvar ; $S_n = 160$ kVA
 $Q_C / S_n = 20 \%$: compensation automatique.

Type	Symbole	Compensation	Protection harmonique	Dépollution du condensateur
Standard		Oui	Oui, 15 %	Non
H		Oui	Oui, 25 %	Non
SAH		Oui	Oui, 100 %	Partielle
FH		Oui	Oui, 100 %	Totale

Exemple

ALPIBLOC est un condensateur ALPIVAR avec disjoncteur intégré. L'ensemble est monté et câblé dans un coffret ou une armoire IP 315.

Cet équipement livré prêt à raccorder est destiné à la compensation en système fixe des appareils électriques de petite et moyenne puissance.

Pour certaines applications (commande à distance...) le disjoncteur peut être remplacé par un contacteur associé à des fusibles HPC.

Classe de température :

- fonctionnement – 10/+ 45 °C (moyenne sur 24 heures : 40 °C) ;
- stockage – 30 / + 60°.

Type standard

- tension nominale 400 V 50 Hz TRI.

Puissance (kvar)	Référence	I_{cu} disjoncteur (kA)	Dimensions (mm)	Poids (kg)
10	B1040	10	190 × 230 × 380	5
15	B1540	10	190 × 230 × 380	5
20	B2040	10	190 × 230 × 380	5
25	B2540	10	190 × 230 × 380	10
30	B3040	10	190 × 230 × 380	10
40	B4040	16	365 × 230 × 380	12
50	B5040	16	365 × 230 × 380	15
60	B6040	16	365 × 230 × 380	15
75	B7540	16	365 × 230 × 380	20
80	B8040	16	365 × 230 × 380	20
100	B10040	35	540 × 230 × 380	28
125	B12540	35	540 × 230 × 380	30

Type H ou renforcé

Tension nominale 440 V 50 Hz TRI.

Puissance (kvar)	Référence	I_{cu} disjoncteur (kA)	Dimensions (mm)	Poids (kg)
10-12,5	B1244	10	190 × 230 × 380	5
12,5-15	B1544	10	190 × 230 × 380	5
16,5-20	B2044	10	190 × 230 × 380	5
20-25	B2544	10	190 × 230 × 380	5
25-30	B3044	10	190 × 230 × 380	10
30-40	B4044	16	365 × 230 × 380	12
40-50	B5044	16	365 × 230 × 380	15
50-60	B6044	16	365 × 230 × 380	15
60-70	B7044	16	365 × 230 × 380	20
66-80	B8044	16	365 × 230 × 380	20
75-90	B9044	35	540 × 230 × 380	25
80-100	B10044	35	540 × 230 × 380	28
100-125	B12544	35	540 × 230 × 380	30