

LE FACTEUR DE PUISSANCE ET LES CONDENSATEURS



LE FACTEUR DE PUISSANCE ET LES CONDENSATEURS

1. Qu'est-ce que le facteur de puissance ?

1.1. Nature de l'énergie active

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent deux formes d'énergie :

- l'énergie active, transformée en travail et en chaleur ;
- l'énergie réactive, utilisée pour créer des champs magnétiques.

Toute machine électrique (moteur, transformateur...) alimentée en courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie :

- l'énergie active correspond à la puissance active P mesurée en kW ; elle se transforme intégralement en énergie mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- l'énergie réactive correspond à la puissance réactive Q mesurée en kvar ; elle sert à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques et elle est nécessaire à leur fonctionnement. Elle est mise à leur disposition par le réseau ou, de préférence, par des condensateurs prévus à cet effet.

Le réseau de distribution fournit l'énergie apparente qui correspond à la puissance apparente (ou puissance appelée) S , mesurée en kVA.

L'énergie apparente est composée vectoriellement des 2 types d'énergie active et réactive.

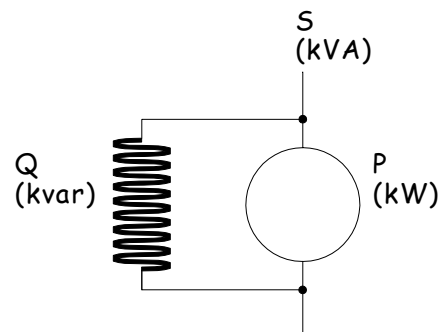


fig. 1 - Un moteur prélève sur le réseau de l'énergie active P et de l'énergie réactive Q .

1.2. Les consommateurs d'énergie réactive

Les récepteurs utilisent une partie de leur puissance apparente sous forme d'énergie réactive.

La consommation d'énergie réactive varie selon les récepteurs.

La proportion de l'énergie réactive par rapport à l'énergie active varie de :

- 65 à 75 % pour les moteurs asynchrones et de
- 5 à 10 % pour les transformateurs.

Par ailleurs les inductances (ballast de tubes fluorescents), les convertisseurs statiques (redresseurs) consomment aussi de l'énergie réactive.

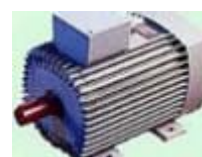


fig. 2 - Les récepteurs consomment de l'énergie réactive.

1.3. Le facteur de puissance

Le facteur de puissance (F) est la proportion de puissance active dans la puissance apparente. Il est d'autant meilleur qu'il est proche de 1.

$$F = \frac{P \text{ (kW)}}{S \text{ (kVA)}} \approx \cos \varphi$$

P = puissance active

S = puissance apparente

Définition du facteur de puissance

Le facteur de puissance F de l'installation est le quotient de la puissance active (kW) consommée par l'installation sur la puissance apparente (kVA) fournie à l'installation.

Il a une valeur comprise entre 0 et 1.

Le $\cos \varphi$ a souvent la même valeur.

Il est, en fait, le facteur de puissance de la composante à fréquence industrielle (50 Hz) de l'énergie fournie par le réseau.

Le $\cos \varphi$ ne prend donc pas en compte la puissance véhiculée par les harmoniques.

Dans la pratique, on a tendance à parler du $\cos \varphi$.

Un facteur de puissance proche de 1 indique une faible consommation d'énergie réactive et optimise le fonctionnement d'une installation.

Représentation vectorielle à partir des puissances

Puissance active (en kW)

■ monophasé Ph-N : $P = V I \cos \varphi$

■ monophasé 2 Ph : $P = U I \cos \varphi$

■ triphasé 3 Ph ou 3 Ph + N : $P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$

Puissance réactive (en kvar)

■ monophasé Ph-N : $Q = V I \sin \varphi$

■ monophasé 2 Ph : $Q = U I \sin \varphi$

■ triphasé 3 Ph ou 3 Ph + N : $Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$

Puissance apparente (en kVA)

■ monophasé Ph-N : $S = V I$

■ monophasé 2 Ph : $S = U I$

■ triphasé 3 Ph ou 3 Ph + N : $S = \sqrt{3} U I$

avec :

V : tension entre phase et neutre

U : tension entre phases

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

On utilise de manière classique la représentation vectorielle (voir figure 3).

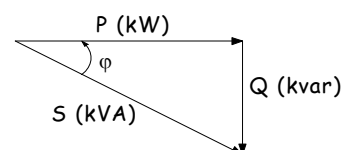


fig. 3 - Représentation vectorielle des puissances.

Représentation vectorielle à partir des courants

A cette représentation établie pour les puissances correspond la représentation des courants (il suffit de diviser les puissances par la tension).

Les courants actif et réactif se composent pour former le courant apparent ou total qui est celui qui parcourt la ligne électrique et se mesure à l'ampèremètre.

La figure 4 ci-contre est la représentation vectorielle où :

It : courant total qui parcourt les conducteurs ;

Ia : courant actif transformé en énergie mécanique ou en chaleur ;

Ir : courant réactif nécessaire à l'excitation magnétique des récepteurs.

Les relations entre ces courants sont :

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \text{ avec : } I_a = I_t \cos \varphi \text{ et } I_r = I_t \sin \varphi$$

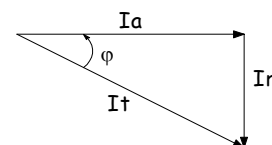


fig. 4 - Représentation vectorielle des courants.

1.4. La tangente φ

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\text{énergie réactive}}{\text{énergie active}}$$

$$\text{ou } \frac{Q \text{ (kvar)}}{P \text{ (kW)}}$$

Certaines factures d'électricité (exemple : abonné au tarif vert) indiquent la valeur de $\operatorname{tg} \varphi$.

Ce rapport illustre l'énergie réactive que le distributeur doit livrer pour fournir une puissance active donnée.

Une valeur de $\operatorname{tg} \varphi$, la plus faible possible, correspond à une installation optimisée.

1.5. Mesure pratique du facteur de puissance

Le facteur de puissance ou $\cos \varphi$ se mesure soit :

- au cosinus φ mètre qui donne une mesure instantanée, soit
- à l'enregistreur varométrique qui permet d'obtenir sur une période déterminée (jour, semaine...) les valeurs d'intensité, de tension et de facteur de puissance. Les mesures sur une période plus longue permettent de mieux estimer le facteur de puissance moyen d'une installation.

1.6. Valeurs pratiques du facteur de puissance

Exemple de calcul des puissances actives et réactives

type circuit		S (puissance apparente)	P (puissance active)	Q (puissance réactive)
monophasé Ph-N		$S = V I$	$P = V I \cos \varphi$	$Q = V I \sin \varphi$
monophasé 2 Ph		$S = U I$	$P = U I \cos \varphi$	$Q = U I \sin \varphi$
exemple :	récepteur 5 kW $\cos \varphi = 0,5$	10 kVA	5 kW	8,65 kvar
triphasé 3 Ph ou 3Ph + N		$S = \sqrt{3} U I$	$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$	$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi$
exemple :	moteur $P_n = 51$ kW $\cos \varphi = 0,86$ $\eta = 0,91$	65 VA	56 kW	33 kvar

V est la tension entre phase et neutre, U est la tension entre phases.

👉 tableau page K271 du catalogue 2002/2003, distribution électrique Merlin Gérin qui indique, entre autres, la correspondance entre le $\cos \varphi$ et la $\tan \varphi$ d'un même angle.

Le calcul des éléments pour l'exemple du tableau ci-dessus en triphasé est le suivant :

P_n = puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur = 51 kW.

P = puissance active consommée ou absorbée =

$$\frac{P_n}{\eta} = \frac{51}{0,9} = 56 \text{ kW}, \eta \text{ étant le rendement du moteur.}$$

$$S = \text{puissance apparente} = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{P}{0,86} = 65 \text{ kVA}$$

$$\cos \varphi = 0,86 \Rightarrow \tan \varphi = 0,59 \text{ (tableau page K271)}$$

$$Q = P \tan \varphi = 56 \times 0,59 = 33 \text{ kvar.}$$

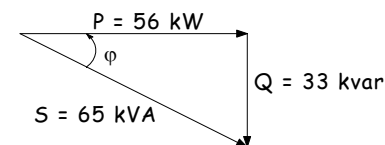


fig. 5 - Exemple de calcul.

Valeurs du $\cos \varphi$ et de $\tan \varphi$ pour les appareils les plus courants

appareil			$\cos \varphi$	$\tan \varphi$
■ moteur asynchrone ordinaire	chargé à	0 %	0,17	5,80
		25 %	0,55	1,52
		50 %	0,73	0,94
		75 %	0,80	0,75
		100 %	0,85	0,62
■ lampes à incandescence			≈ 1	≈ 0
■ lampes à fluorescence non compensées			$\approx 0,5$	$\approx 1,73$
■ lampes à fluorescence compensées (0,93), parfois (0,86)			0,93 ou 0,86	0,39 ou 0,59
■ lampes à décharge			0,4 à 0,6	2,29 à 1,33
■ fours à résistance			≈ 1	≈ 0
■ fours à induction avec compensation intégrée			$\approx 0,85$	$\approx 0,62$
■ fours à chauffage diélectrique			$\approx 0,85$	0,62
■ machines à souder à résistance			0,8 à 0,9	0,75 à 0,48
■ postes statiques monophasés de soudage à l'arc			$\approx 0,5$	$\approx 1,73$
■ groupes rotatifs de soudage à l'arc			0,7 à 0,9	1,02 à 0,48
■ transformateurs-redresseurs de soudage à l'arc			0,7 à 0,8	1,02 à 0,75
■ fours à arc			0,8	0,75

2. Pourquoi améliorer le facteur de puissance ?

2.1. Avantages d'ordre économique

L'amélioration du facteur de puissance d'une installation présente de multiples avantages d'ordre économique et technique et permet de réduire la facture d'électricité.

En tarif vert

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

En tarif jaune

L'installation de condensateurs permet à l'abonné au tarif jaune BT E.D.F. (puissance apparente comprise entre 36 et 250 kVA) de réduire la puissance souscrite.

2.2. Avantages technico-économiques

Un bon facteur de puissance **quelque soit le tarif** permet :

- une diminution de la section des câbles ;
- une diminution des pertes en ligne ;
- une réduction de la chute de tension ;
- une augmentation de la puissance disponible.

3. Comment compenser une installation ?

3.1. Principe théorique

Améliorer le facteur de puissance d'une installation consiste à installer un condensateur, source d'énergie réactive. Cela s'appelle compenser l'installation.

L'installation d'une batterie de condensateurs de puissance Q_c diminue la quantité d'énergie réactive fournie par le réseau.

La puissance de la batterie de condensateurs à installer se calcule à partir de la puissance active de la charge (P_a en kW) et du déphasage tension courant avant (φ) et après (φ') compensation.

Le fait d'installer un condensateur générateur d'énergie réactive est un moyen simple, souple et vite amorti de s'assurer d'un bon facteur de puissance. Cela s'appelle compenser une installation.

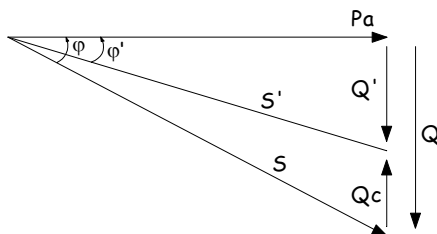


fig. 6 - Schéma de principe de la compensation : $Q_c = P_a (\tan \varphi - \tan \varphi')$.

La figure ci-dessus illustre le principe de compensation de la puissance réactive Q d'une installation à une valeur plus faible Q' par la mise en œuvre d'une batterie de condensateurs de puissance Q_c . Dans le même temps, la puissance apparente passe de S à S' .

Exemple :

Soit un moteur qui, en régime normal, absorbe une puissance de 100 kW avec un $\cos \varphi = 0,75$, soit $\tan \varphi = 0,88$.

Pour passer à un $\cos \varphi = 0,93$ soit $\tan \varphi = 0,40$, la puissance de la batterie à installer est :

$$Q_c = 100 (0,88 - 0,40) = 48 \text{ kvar.}$$

Les éléments du choix du niveau de compensation et de calcul de la puissance en kvar de la batterie dépendent de l'installation considérée.

Nota :

En préalable à la compensation, un certain nombre de précautions sont à prendre. On évitera, en particulier, le surdimensionnement des moteurs, ainsi que leur marche à vide grâce à des commandes individuelles.

3.2. Avec quoi compenser ?

Compensation en BT.

En basse tension la compensation est réalisée avec deux familles de produits :

- les condensateurs de valeurs fixes ou condensateurs fixes ;
- les équipements à régulation automatique ou batteries automatiques qui permettent d'ajuster en permanence la compensation aux besoins de l'installation.

Condensateurs fixes.

Ces condensateurs sont d'une puissance unitaire constante et leur mise en œuvre peut être :

- manuelle : commande par disjoncteur ou interrupteur ;
- semi-automatique : commande par contacteur ;
- directe : asservie aux bornes d'un récepteur.

Ils s'utilisent :

- aux bornes des récepteurs de type inductifs (moteurs et transformateurs) ;
- sur un jeu de barres où se trouvent de nombreux petits moteurs dont la compensation individuelle serait trop coûteuse ;
- dans le cas où la fluctuation de charge est faible.

Remarque :

Lorsque la puissance à installer est supérieure à 800 kvar avec une charge stable et continue, il peut être plus économique de choisir des batteries de condensateurs haute tension à installer sur le réseau.

La compensation d'énergie réactive peut se faire avec des condensateurs fixes.



fig. 7 - Exemple de condensateurs fixes.

La compensation d'énergie réactive se fait le plus souvent par batterie de condensateurs à régulation automatique.

Les batteries à régulation automatique permettent l'adaptation immédiate de la compensation aux variations de la charge.

Batteries de condensateurs à régulation automatique.

Ce type d'équipement permet l'adaptation automatique de la puissance réactive fournie par les batteries de condensateurs en fonction du $\cos \varphi$ désiré et imposé en permanence.

Il s'utilise dans les cas où la puissance réactive consommée ou la puissance active varient dans des proportions importantes :

- aux bornes des tableaux généraux BT ;
- pour les gros départs.



fig. 8 - Exemple de batterie à régulation automatique.

Principe et intérêt de la compensation automatique

Installées en tête de l'ensemble de la distribution BT ou d'un secteur important, les batteries de condensateurs sont divisées en gradins.

La valeur du $\cos \varphi$ est détectée par un relais varmétrique qui commande automatiquement l'enclenchement et le déclenchement des gradins en fonction de la charge et du $\cos \varphi$ désiré.

Le transformateur de courant doit être placé en amont des récepteurs et des batteries de condensateurs.

La compensation automatique permet l'adaptation immédiate de la compensation aux variations de la charge et évite, ainsi le renvoi d'énergie réactive sur le réseau EDF et les surtensions dangereuses pour les circuits d'éclairage lors des marches à faibles charge de l'installation.

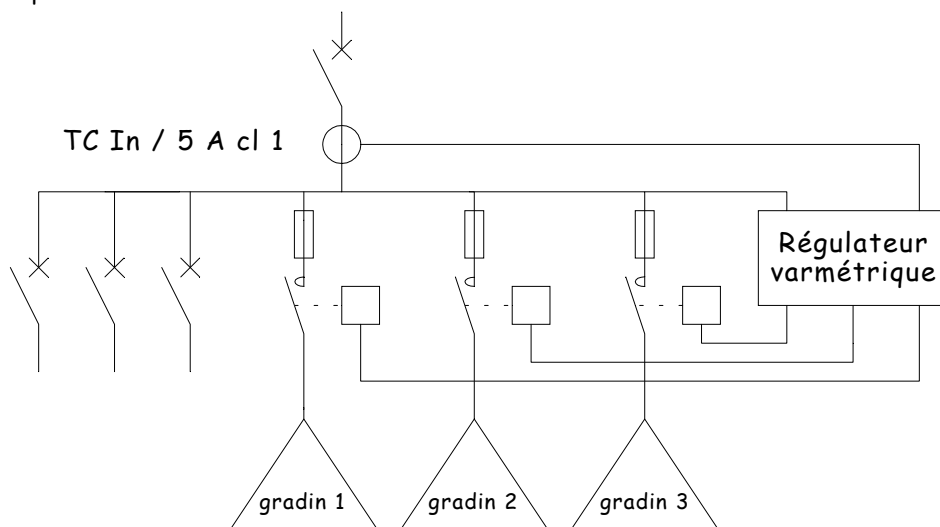


fig. 9 - Principe de la compensation automatique d'une installation.



fig. 10 - Régulateur varmétrique.



Fig. 11 - Exemples de batteries de condensateurs à régulation automatique.

3.3. Choix entre condensateurs fixes ou batteries à régulation automatique

Règles pratiques :

- si la puissance des condensateurs (kvar) est inférieure à 15 % de la puissance du transformateur, choisir des condensateurs fixes ;
- si la puissance des condensateurs (kvar) est supérieure à 15 % de la puissance du transformateur, choisir une batterie de condensateurs à régulation automatique.

4. Où compenser ?

La localisation des condensateurs BT sur un réseau électrique constitue ce que l'on appelle le mode de compensation. La compensation d'une installation peut être réalisée de différentes façons. Cette compensation peut être globale, partielle (par secteur), ou locale (individuelle).

En principe, la compensation idéale est celle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Des critères technico-économiques en déterminent le choix.

4.1. Compensation globale

Lorsque la charge est stable et continue, une compensation globale convient.

Principe

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la marche normale de l'usine.

Intérêt

Le foisonnement naturel de l'installation entraîne un dimensionnement faible de la batterie et un nombre élevé d'heures de fonctionnement. Elles sont donc amorties encore plus rapidement.

De plus ce type de compensation :

- supprime les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : tarif vert) ;
- diminue la puissance apparente (ou appelée) en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation (exemple : tarif jaune) ;
- soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW).

Remarques

- le courant réactif est présent dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs ;
- les pertes par effet Joule (kWh) dans les câbles situés en aval et leur dimensionnement ne sont de ce fait pas diminuées.

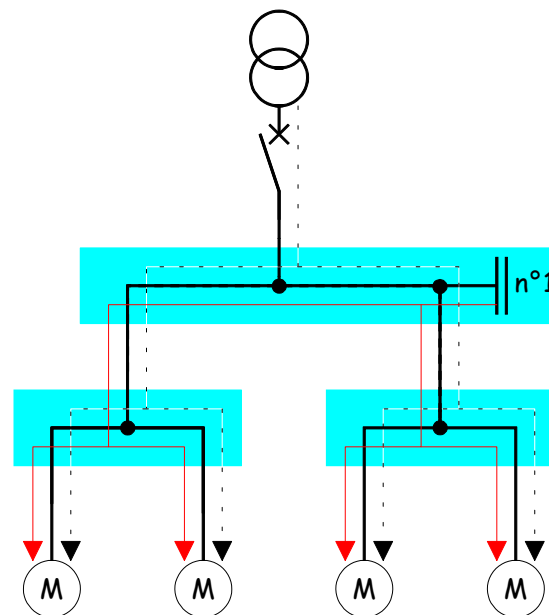


Fig. 12 - Compensation globale.

4.2. Compensation partielle

Une compensation partielle est conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

Principe

La batterie est raccordée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive par atelier à un groupe de récepteurs.

Une grande partie de l'installation est soulagée, en particulier les câbles d'alimentation de chaque atelier.

Intérêt

Ce type de compensation :

- supprime les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : tarif vert) ;
- soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW) ;
- optimise une partie du réseau, le courant réactif n'étant pas véhiculé entre les niveaux 1 et 2.

Remarques

- le courant réactif est présent dans l'installation du niveau 2 jusqu'aux récepteurs ;
- les pertes par effet Joule (kWh) dans les câbles sont ainsi diminuées ;
- il y a un risque de surcompensation par suite de variations de charge importante (ce risque est éliminé par la compensation automatique avec batteries composées de gradins).

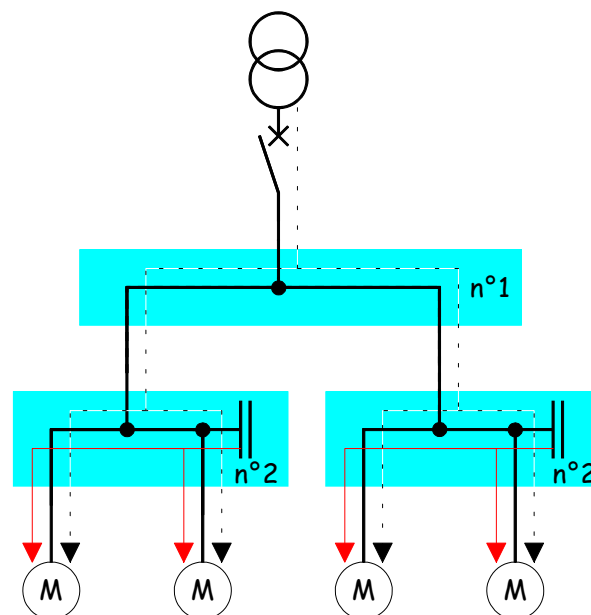


Fig. 13 - Compensation partielle.

4.3. Compensation individuelle

Une compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance totale.

C'est le type de compensation qui offre le plus d'avantages.

Principe

La batterie est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur de type inductif (notamment moteurs).

Cette compensation individuelle est à envisager lorsque la puissance du moteur est importante par rapport à la puissance souscrite.

La puissance en kvar de la batterie représente environ 25 % de la puissance en kW du moteur. Lorsqu'elle est possible, cette compensation produit l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée aux besoins.

Intérêt

Ce type de compensation :

- supprime les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive ;
- soulage le poste de transformation (puissance disponible en kW) ;
- diminue le dimensionnement des câbles et réduit les pertes par effet Joule (kWh).

Remarques

- le courant réactif n'est plus présent dans les câbles de l'installation.

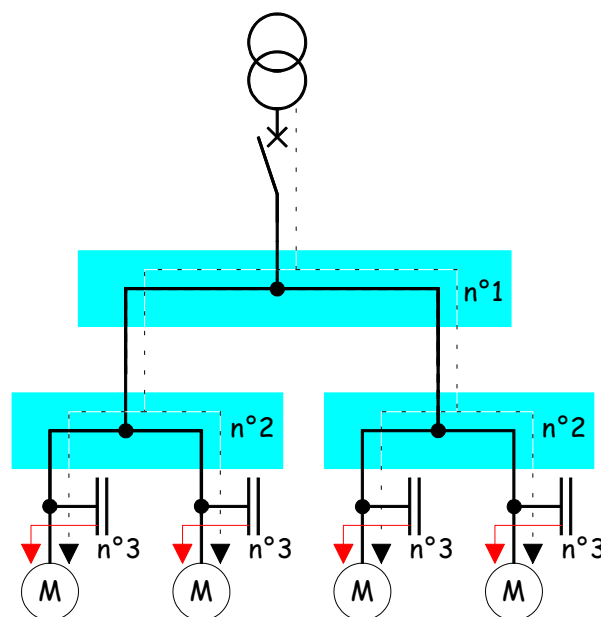


Fig. 14 - Compensation individuelle.