

V. La compensation de l'énergie réactive

V. LA COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

La compensation de l'énergie réactive est un élément important pour réduire la facture d'énergie et améliorer la qualité du réseau électrique.

V.1. L'énergie réactive

Il est important de bien définir l'énergie réactive, sa provenance et ses effets dans les réseaux électriques.

a. Nature des énergies active et réactive, puissance apparente

Tout système électrique (câble, ligne, transformateur, moteur, éclairage, ...) utilisant le courant alternatif met en jeu deux formes d'énergie : l'énergie active et l'énergie réactive.

- ✓ **L'énergie active consommée** (kWh) : Elle résulte de l'utilisation de puissance active P (kW) essentiellement par les récepteurs. Elle se transforme intégralement en énergie mécanique, thermique ou lumineuse.
- ✓ **L'énergie réactive consommée** (kvarh) : Elle sert à la magnétisation des circuits magnétiques des machines (transformateurs et moteurs). De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. Elle correspond à la puissance réactive Q (kvar) des récepteurs.
- ✓ **La puissance apparente** (kVA) : Elle permet de déterminer la valeur du courant absorbé par un récepteur.

b. Composantes active et réactive du courant

A chacune de ces énergies active et réactive correspond un courant.

- ✓ **Le courant actif** (I_a) est en phase avec la tension du réseau.
- ✓ **Le courant réactif** (I_r) est déphasé de 90° par rapport au courant actif, en arrière (récepteur inductif) ou en avant (récepteur capacitif).
- ✓ **Le courant apparent** (I_t) (total) est le courant résultant qui parcourt le câble électrique depuis la source jusqu'au récepteur. Ce courant est déphasé d'un angle φ par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension).

Pour un courant ne comportant pas de composantes harmoniques, ces courants se composent vectoriellement en valeurs efficaces.

I_t : courant apparent ;

I_a : courant actif ;

I_r : courant réactif

φ : déphasage entre le courant apparent et le courant actif (égal au déphasage entre le courant apparent et la tension)

Les courants actifs, réactif, apparent et le déphasage sont liés par les relations suivantes :

Dans le cas d'absence d'harmoniques $\cos \varphi$ est égal au facteur de puissance.

c. Composantes active et réactive de la puissance

Pour des courants et des tensions ne comportant pas de composantes harmoniques,

Le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances ; il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau.

On définit ainsi, pour un circuit monophasé :

La puissance active

$$P = VI \cos \varphi \text{ (en } W \text{ ou } kW \text{)}$$

La puissance réactive

$$Q = VI \sin \varphi \text{ (en var ou } k\text{var)}$$

La puissance apparente

$$S = VI \text{ (en VA ou } kVA \text{)}$$

S : puissance apparente

P : puissance active

Q : puissance réactive

φ : déphasage entre la puissance apparente et la puissance active (égal au déphasage entre le courant et la tension)

Dans le cas d'absence d'harmoniques, les expressions des puissances active, réactive et apparente sont les suivantes : $P = VI \cos \varphi + j Q = VI \sin \varphi \Rightarrow S = VI$

$$\text{D'où } S = (P^2 + Q^2)^{1/2}$$

Dans ce cas $\cos \varphi = P/S$ est appelé facteur de puissance.

d. Facteur de puissance

Le facteur de puissance est défini par le rapport suivant :

En l'absence d'harmoniques, le facteur de puissance est égal à $\cos \varphi$

Par contre, en présence d'harmoniques ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$F = F_d \cos \varphi$$

F_d : facteur de déformation

Par exemple, pour un variateur de vitesse (générateur de courants harmoniques de valeur importante) :

$$F = 0,54$$

$$\cos \varphi = 0,85$$

Le $\cos \varphi$ (et donc le facteur de puissance) est d'autant meilleur qu'il est proche de 1. Nous allons voir qu'augmenter le $\cos \varphi$ optimise le fonctionnement du réseau électrique.

e. La valeur tg

On utilise souvent tg au lieu de \cos .

En l'absence d'harmoniques, l'expression de tg est la suivante :

Et l'on a la relation :

f. Circulation de l'énergie réactive

La circulation de l'énergie réactive a des influences importantes sur le choix des matériels et le fonctionnement des réseaux. Elle a, par conséquent, des incidences économiques.

Ainsi, en raison de l'augmentation du courant apparent, la circulation d'énergie réactive provoque : Des surcharges et des échauffements supplémentaires dans les transformateurs et les câbles qui ont pour conséquence des pertes d'énergie active Des chutes de tension.

Les conséquences de la circulation d'énergie réactive conduisent donc à surdimensionner les équipements électriques du réseau.

Pour éviter la circulation de cette énergie réactive dans le réseau, il faut la produire au plus près des consommateurs.

De façon pratique, on installe des condensateurs qui fournissent l'énergie réactive demandée par les matériels inductifs.

Ainsi, cette énergie réactive ne circule qu'entre les condensateurs et les consommateurs d'énergie réactive. Il est alors évident que plus les condensateurs seront proches des consommateurs, moins les conséquences de la circulation d'énergie réactives seront importantes.

Pour éviter les conséquences d'une circulation d'énergie importante sur leur réseau, les distributeurs facturent généralement l'énergie réactive au-delà d'un certain seuil ; cela incite les utilisateurs à compenser l'énergie réactive qu'ils consomment.

g. Energie réactive et éléments du réseau

- ✓ **Les machines synchrones** : Ce sont les alternateurs et les moteurs synchrones. En agissant sur le courant d'excitation, on fait varier la puissance réactive de la machine. Pour un fort courant d'excitation, la machine fournit de la puissance réactive ($Q > 0$) et pour un faible courant d'excitation, elle absorbe de la puissance réactive ($Q < 0$). Les machines synchrones peuvent donc fournir une partie de la puissance réactive demandée.
- ✓ **Les machines asynchrones** : Ce sont les moteurs et les génératrices asynchrones. Elles absorbent de l'énergie réactive, avec un $\cos\phi$ d'autant plus bas que la charge est faible
- ✓ **Les lignes et les câbles** Les caractéristiques L et C des lignes et des câbles sont telles que ces éléments sont consommateurs ou producteurs d'énergie réactive selon leur charge.

Pour une liaison triphasée :

C : capacité de la liaison L : inductance de la liaison V : tension simple

I : courant véhiculé par la liaison De façon pratique :

- les lignes consomment de la puissance réactive

- les câbles MT produisent de la puissance réactive à faible charge et en consomment à forte charge -
les câbles BT consomment de la puissance réactive.

Les transformateurs

Un transformateur consomme une puissance réactive qui peut être déterminée approximativement en ajoutant :

- une partie fixe qui dépend du courant magnétisant à vide I_0 :

- une partie approximativement proportionnelle au carré de la puissance apparente qu'il transite :

U_{cc} : tension de court-circuit du transformateur en p.u.

S : puissance apparente transitée par le transformateur

S_n : puissance apparente nominale du transformateur

U_n : tension composée nominale

La puissance réactive totale consommée par le transformateur est :

Les inductances

Elles consomment de la puissance réactive ; elles sont utilisées par exemple pour stabiliser l'arc des lampes fluorescentes ou des fours.

Les condensateurs

Ils fournissent de la puissance réactive avec un très bon rendement, c'est pourquoi ils sont utilisés pour cette application.

V.2. Intérêts de la compensation d'énergie réactive

a. Suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive

Pour les gros consommateurs, l'énergie réactive est facturée au-delà d'un seuil pendant certaines périodes.

En France, l'énergie réactive est facturée pour les clients possédant un contrat "tarif vert" (puissance apparente > 250 kVA).

EDF fournit gratuitement l'énergie réactive :

- jusqu'à concurrence de 40 % de l'énergie active consommée ($tg\varphi = 0,4$) pendant les heures de pointe en décembre, janvier, février et les heures pleines de novembre, décembre, janvier, février et mars (de 6 h à 22 h)

- sans limitation pendant les heures creuses (de 22 h à 6 h) de novembre, décembre, janvier, février et mars et pendant la totalité des heures d'avril à octobre.

Pendant les périodes soumises à limitation, l'énergie réactive consommée au delà de $tg\varphi 0,4$, est facturée mensuellement au tarif mentionné dans les barèmes de prix en vigueur (10 à 13 centimes / kvarh en 1997).

La quantité d'énergie réactive facturée W_f est égale à :

W_r (kvarh) : énergie réactive consommée mensuellement pendant la période soumise à limitation W_a

kWh) : énergie active consommée mensuellement pendant la période soumise à limitation $W_{gr} 0,4 W_a$

: quantité d'énergie réactive livrée gratuitement

La compensation d'énergie réactive permet d'obtenir, et ainsi de supprimer les coûts de l'énergie réactive.

b. Réduction de la puissance souscrite en kVA

Pour les petits consommateurs, le distributeur facture "une prime fixe" qui dépend de la puissance apparente souscrite. Au-delà de cette puissance le consommateur paye des pénalités.

La compensation d'énergie réactive permet de réduire la prime fixe en diminuant la puissance apparente souscrite.

En France, la prime fixe sur la puissance apparente est payée par les clients possédant un contrat "tarif jaune" (puissance apparente comprise entre 36 et 250 kVA).

V.3. Matériel de compensation d'énergie réactive

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits : - les condensateurs de valeurs fixes ou batterie fixe

- les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques) qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation.

Batteries fixes

La batterie de condensateurs a une puissance constante. Elles sont utilisées de préférence :

- aux bornes des récepteurs
- sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible.

Batteries de condensateurs en gradins avec régulation automatique

Ce type d'équipement permet d'ajuster la puissance réactive fournie aux variations de consommation, et ainsi de maintenir le $\cos\phi$ à la valeur désirée.

Il s'utilise dans les cas où la puissance réactive consommée est forte vis-à-vis de la puissance du transformateur et varie dans des proportions importantes, c'est-à-dire essentiellement :

- aux bornes des tableaux généraux BT
- sur les départs de puissance importante.

Remarque :

L'évolution de l'électronique de puissance a commencé à engendrer des changements majeurs dans les réseaux électriques. A l'exception de quelques appareils utilisant l'électronique de puissance (disjoncteurs, transformateurs à prises variables et compensateur statique à thyristors), les réseaux électriques comportaient jusqu'à récemment des appareillages passifs. Par ailleurs le maillage des lignes exige de plus en plus le contrôle des puissances transitées. La complexité des réseaux exige des marges de sécurité accrues afin que les perturbations locales ne provoquent pas des instabilités qui pourraient se répandre sur tout le réseau.

Les FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) développés à partir des années 1990 augmentent les marges de manœuvre des réseaux en exploitant les possibilités offertes par l'électronique de puissance en particulier les nouveaux composants contrôlables (GTO, IGBT...).