

Chapitre 8

Puissance réactive et amélioration du facteur de puissance

1. Introduction :

Le distributeur d'électricité doit, en même temps qu'il délivre la puissance active appelée par la clientèle, être également en mesure de satisfaire l'équilibre offre-demande d'énergie réactive ; il a de plus pour mission de fournir une tension aussi régulière aux bornes des installations des utilisateurs. Outre ces obligations à l'égard de ces clients, il est également de son intérêt de minimiser les inconvénients dus à la circulation de l'énergie réactive sur l'ensemble de ces réseaux ; il doit en outre respecter un certain nombre de contraintes techniques en matière de tension, afin de garantir le bon fonctionnement de ses matériels.

2. Puissance réactive :

Un réseau a pour fonction de transporter la **puissance** (ou l'**énergie**) depuis une source de production vers un centre de consommation appelé **charge** ou **récepteur**. La charge est caractérisée par sa tension, son courant, son impédance et son facteur de puissance.

Tout système électrique fonctionnant sous tension alternative consomme de l'énergie sous deux formes, l'**énergie active** et l'**énergie réactive**, puisque la tension et le courant sont rarement en phase.

En régime sinusoïdal, à la fréquence industrielle (50 Hz), appelons :

U et **I** les valeurs efficaces respectivement de la tension **u** et du courant **i**,

φ le déphasage entre **u** et **i** (compté positivement si le courant est en retard sur la tension).

- La **puissance apparente**, fournie par la source de production $S = U I$ (en triphasé $S = \sqrt{3} U I$), impose les dimensions du générateur et du réseau de transport ou de distribution.
- Seule la **puissance active**, reçue par la charge, se transforme en énergie mécanique, thermique, lumineuse, etc. C'est la puissance utile qui transite par la charge et qui est : $P = U I \cos(\varphi)$ (en triphasé $P = \sqrt{3} U I \cos(\varphi)$)

Par rapport à la puissance apparente **S**, la puissance active **P** est réduite d'un facteur de puissance **cos(φ)** entraînant des pertes d'efficacité du réseau.

- La **puissance réactive**, non utilisée, est :

$$Q = U I \sin(\varphi) \text{ (en triphasée } Q = \sqrt{3} U I \sin(\varphi))$$

Ainsi, on obtient :

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

En réalité, la puissance réactive sert à l'aimantation des circuits magnétiques des machines électriques (transformateurs et moteurs) et de certains appareils tels que les lampes fluorescentes. Mais, par contre, la transporter en même temps que la puissance active conduit à surdimensionner les lignes de transport et de distribution et donc à augmenter le coût ou à les faire fonctionner à leurs limites, ce qui peut conduire à des instabilités néfastes pour la qualité de service.

On montre que la **puissance réactive** a des **propriétés de conservation** dans le réseau. Par convention, tout élément inductif du réseau ($\varphi > 0$) consomme de l'énergie réactive et tout élément capacitif ($\varphi < 0$) en produit. Il est aisé de calculer ces consommations et productions.

La puissance réactive **consommée** par une inductance L parcourue par un courant I est :

$$Q_L = L \omega I^2$$

La puissance réactive **produite** par une capacité C soumise à une tension U est égale à :

$$Q_C = C \omega U^2$$

avec $\omega = 2 \pi f$ (ω étant la pulsation du réseau en radians par seconde et f la fréquence en hertz).

Comme pour la puissance active, on peut établir, aux nœuds du réseau ou sur tout trajet du courant, des bilans équilibrés de puissance réactive. Le **bilan global** est le suivant :

- les charges sont très généralement inductives, c'est-à-dire consommatrices de puissance réactive ;
- les lignes aériennes produisent de l'énergie réactive du fait de leur capacité lorsqu'elles sont peu chargées ; elles en consomment lorsqu'elles sont fortement chargées ;
- les câbles souterrains en produisent du fait de leur faible inductance et de leur grande capacité ;
- les transformateurs en consomment.

Globalement, le réseau et ses charges appellent de l'énergie réactive, sauf aux heures creuses.

Ainsi, il s'établit, sur les réseaux, une forte circulation de puissance réactive, ce qui se traduit par des **cos(φ)** faibles en tout point du réseau, par conséquent, de fortes pertes de rendement et un surdimensionnement des réseaux. L'ampleur du phénomène est telle que, dans bien des cas, le réseau ainsi constitué deviendrait inexploitable.

La **solution** consiste à produire de la puissance réactive au voisinage des lieux de consommation. C'est le **rôle des condensateurs de puissance**. Placés près des éléments inductifs, ces condensateurs leur fournissent directement de la puissance réactive ; celle-ci n'a

plus à circuler sur le réseau d'alimentation ; on limite ainsi les instabilités et les surdimensionnements des réseaux.

3. Energie réactive et pertes joules :

Considérons un réseau, assimilable à une résistance R en série avec une inductance X , qui alimente une charge consommant une puissance active P et une puissance réactive Q , voir Fig.1.

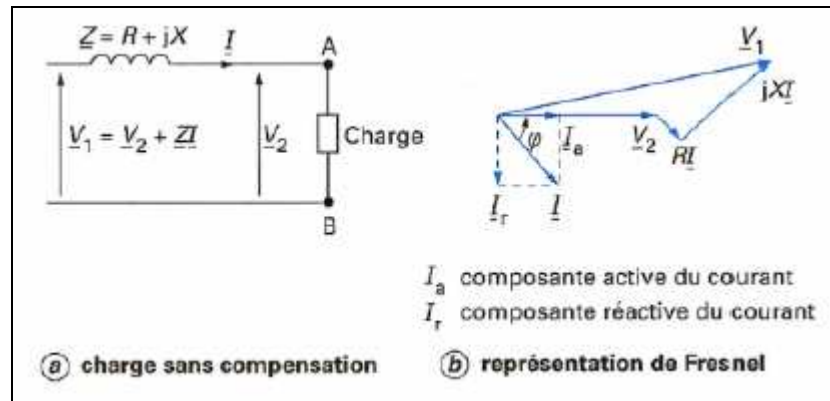


Fig.1. Circuit sans compensation : schéma unifilaire.

Ce réseau est parcouru par un courant I de valeur efficace :

- en monophasé : $I = \frac{S}{V_2}$ avec V_2 tension efficace aux borne du récepteur et S puissance apparente absorbée.
- en triphasé : $I = \frac{S}{\sqrt{3} U_2}$ avec U_2 tension composée efficace.

Ce transport d'énergie s'accompagne de pertes joule :

- en monophasé : $P_J = R I^2 = \frac{R (P^2 + Q^2)}{V_2^2} = \frac{R P^2}{V_2^2} (1 + \text{tg}^2(\phi))$.
- en triphasé : $P_J = 3 R I^2 = \frac{R P^2}{U_2^2} (1 + \text{tg}^2(\phi))$.

Il est à noter que le terme $\frac{R P^2}{V_2^2} \text{tg}^2(\phi)$ (ou $\frac{R P^2}{U_2^2} \text{tg}^2(\phi)$) représente le surplus de pertes joules occasionné par le transport d'énergie réactive.

On voit, en outre, qu'augmenter la tension permet de réduire les pertes joules.

4. Influence de la circulation d'énergie réactive sur les écarts de tension :

Si l'on considère le réseau étudié précédemment, on peut approcher l'écart de tension $V_1 - V_2$ par la formule :

- en monophasé : $V_1 - V_2 \approx R I \cos(\varphi) + X I \sin(\varphi) = \frac{R P + X Q}{V_2}$.
- en triphasé : $U_1 - U_2 \approx \frac{R P + X Q}{U_2}$.

5. Compensation de la puissance réactive :

■ Principe

La **Fig.1** représente un réseau à prépondérance inductive et sa représentation de Fresnel, avec son impédance complexe $\underline{Z} = R + j X$ et sa tension $\underline{V}_2$ aux bornes de la charge.

On propose d'**améliorer le facteur** de puissance par une compensation locale à l'aide de condensateurs de puissance de capacité C . La **Fig.1** montre que, en calculant C pour que le courant $\underline{I}'$ ait la même valeur que la composante réactive $\underline{I}_r$ du circuit initial, cette compensation réduit le courant transporté par la ligne tout en assurant une alimentation correcte du récepteur. Cette réduction peut atteindre 20 à 40 %.

Il faut remarquer que la portion AB de ligne alimentant la charge reste parcourue par la même puissance apparente S .

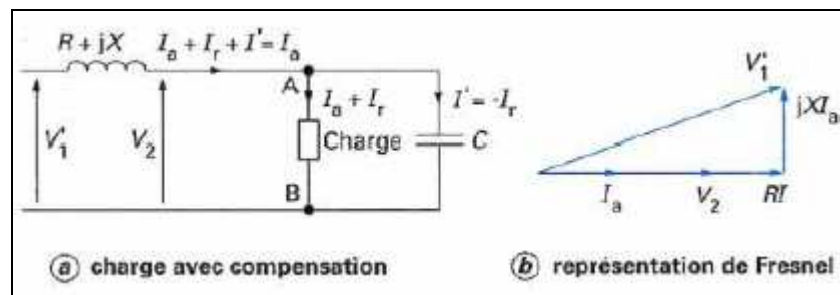


Fig.1. Circuit avec compensation réactive : schéma unifilaire.

■ Méthode de calcul

Pour déterminer la puissance réactive à compenser, deux cas peuvent se présenter selon que la charge est constante (par exemple constitué par une machine unique) ou variable (par exemple constitué par un ensemble de plusieurs machines).

- **Charge constante** : Soit P la puissance active et Q la puissance réactive absorbée par la machine ; leurs valeurs peuvent être fournies soit par le constructeur, soit par une mesure.

En l'absence de compensation, $\tan(\varphi)$, de la machine, est donnée par l'expression :

$$\text{tg}(\varphi) = \frac{Q}{P}$$

Si l'on veut, à l'aide d'une batterie de condensateurs, diminuer $\text{tg}(\varphi)$ jusqu'à une valeur $\text{tg}(\varphi)_1$, la puissance réactive Q_c de cette batterie devra être telle que :

$$Q_c = P [\text{tg}(\varphi) - \text{tg}(\varphi)_1]$$

- **Charge variable constituée par un ensemble de machine** : ce cas se rencontre plus fréquemment que le précédent. Il faut alors tenir compte d'une valeur moyenne de $\text{tg}(\varphi)$ ($\text{tg}(\varphi)_{\text{moy}}$) pour l'installation. Par conséquent, le calcul de Q_c se fait en remplaçant $\text{tg}(\varphi)$ par $\text{tg}(\varphi)_{\text{moy}}$ ce qui donne :

$$Q_c = P [\text{tg}(\varphi)_{\text{moy}} - \text{tg}(\varphi)_1]$$

6. Emploi des condensateurs en THT, HT, MT et BT :

On distingue deux types de compensation réactive :

▪ Compensation shunt

Les condensateurs de puissance sont installés en dérivation sur le réseau. Pratiquement, ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile (simple étoile ou double étoile, voir **Fig.3**) ou triangle (voir **Fig.4**). Le nombre de condensateurs connectés dépend de la puissance réactive totale nécessaire et de la puissance unitaire.

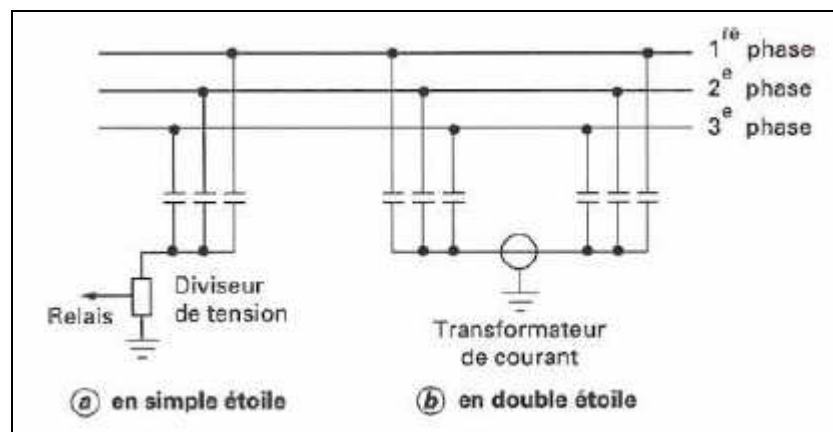


Fig.3. Batteries shunt en étoile : principe.

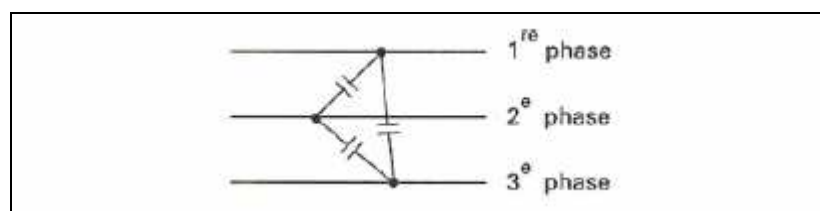


Fig.4. Batteries shunt en triangle : principe.

Les condensateurs shunt sont utilisés :

- soit en BT, souvent au plus près des appareils d'utilisation ;
- soit en MT, où ils sont regroupés en batteries de quelques mégavars ;
- soit en HT, avec des batteries de plusieurs dizaines de mégavars ;
- soit, enfin, en THT, avec des batteries de quelques centaines de mégavars.

■ Compensation série

Les condensateurs de puissance sont placés en série sur le réseau dont ils compensent partiellement la réactance (voir **Fig.5**). Cette compensation, employée sur certaines lignes HT ou THT qui sont à la fois très chargées et très longues, contribue à la stabilité de la tension du réseau.

Mentionnons simplement que les principaux problèmes résident dans la protection contre les surintensités qui traversent les batteries de condensateurs lorsqu'un court-circuit se produit sur les lignes où elles sont installées.

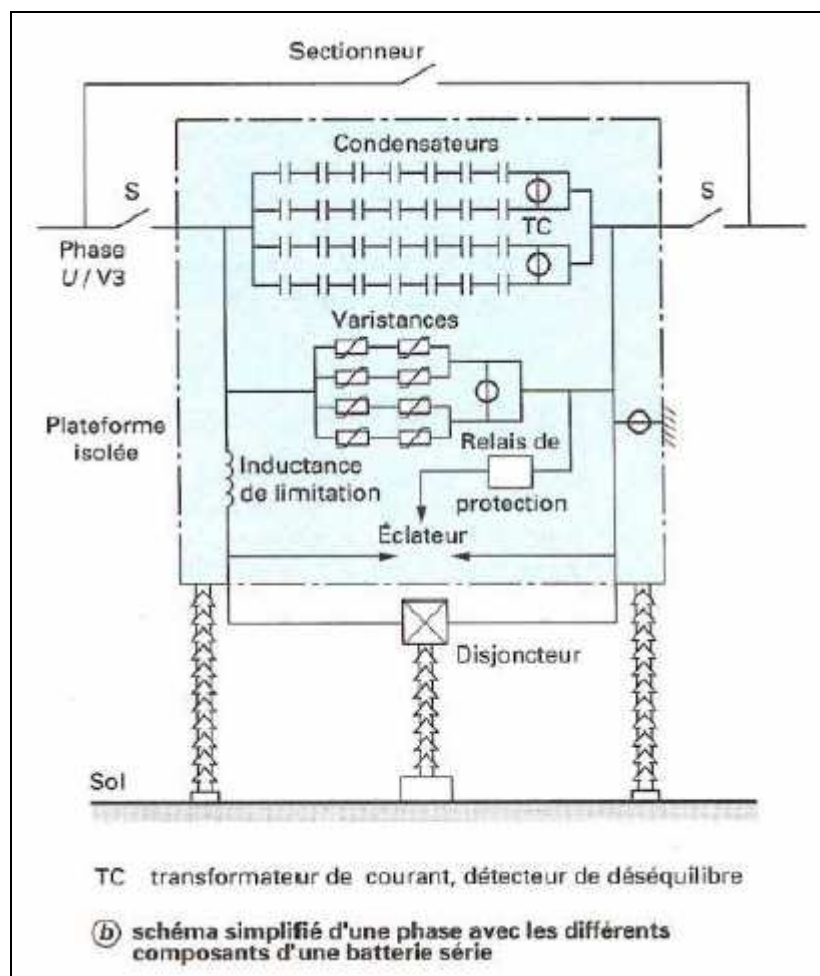


Fig.5. Batteries en série.

7. Systèmes de compensation :

7.1. Compensation en BT :

Les batteries de condensateurs en basse tension sont installées chez le client (en général, les consommateurs industriels) en aval du poste de comptage. Le client industriel peut utiliser au mieux son contrat de fourniture de l'énergie, en améliorant le facteur de puissance de son installation.

Actuellement, les condensateurs BT une tension assignée qui dépasse rarement 1 000 V. Ils sont généralement triphasés et couplés en triangle.

En général, les batteries ont une puissance modérée ($Q < 1 \text{ M var}$). Elles peuvent être équipées d'inductances de choc pour limiter le courant d'appel à l'enclenchement ou d'inductances antiharmoniques pour protéger les condensateurs des harmoniques. La commande des batteries est soit manuelle, soit automatique par relais varmétrique ou par horloge.

On peut distinguer quatre types de compensation (voir **Fig.6**) selon les conditions qui peuvent se présenter sur le réseau de distribution de l'utilisateur.

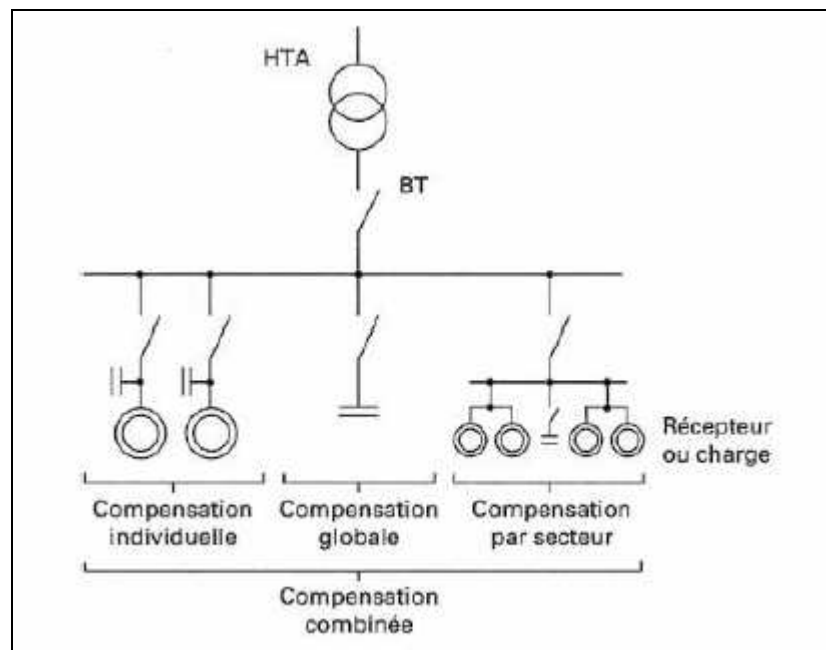


Fig.6. Les quatre types de compensation à basse tension.

▪ Compensation individuelle

Elle est surtout conseillée lorsqu'un récepteur, de puissance supérieure à 25 kW, demeure sous tension pendant la majeure partie des heures de travail. C'est surtout le cas des moteurs entraînant des machines de grande inertie (pompes, compresseurs ou ventilateurs). La manœuvre de l'interrupteur propre au récepteur provoque alors automatiquement l'enclenchement ou le déclenchement de la batterie de condensateurs.

Les **avantages** de ce type de compensation sont les suivants :

- la production d'énergie réactive se fait directement à l'endroit où elle est consommée ; il en résulte une diminution de la charge en courant réactif, de la puissance apparente, des pertes et des chutes de tension dans les conducteurs ;
- dans un bon nombre de cas, il n'est pas nécessaire de prévoir un interrupteur pour les condensateurs, ni des fusibles, ni des dispositifs spéciaux de décharge ; ceux du récepteur étant utilisés à cette fin.

Les **inconvénients** sont les suivants :

- la compensation individuelle ne permet pas d'utiliser la puissance des condensateurs installés, quand il s'agit de récepteurs qui ne sont pas souvent alimentés ;
- pour les petits récepteurs, la compensation individuelle est relativement coûteuse ;
- lorsque la batterie est enclenchée, elle relève localement la tension du réseau industriel ; pendant la période de faibles charges sur le réseau public, il faut mettre hors service la batterie pour réduire la tension, car une tension sur l'installation supérieure à la tension des équipements du client risquerait de provoquer un vieillissement prématuré des appareils en service ; la batterie doit être équipée de ses propres appareillages de coupure et ces exigences diminuent sensiblement l'intérêt économique d'une telle compensation ;
- une batterie installée sur les réseaux publics équipés de télécommande centralisée (à 175 Hz ou 188 Hz), doit être munie de dispositifs de blocage à fréquence musicale ; ce qui alourdit encore le coût d'une compensation individuelle.

■ **Compensation par secteur (groupe)**

Elle est utilisée lorsque plusieurs récepteurs sont reliés à une même batterie de condensateurs équipée par son propre organe de coupure. Elle est conseillée pour des installations où les appareils électriques sont mis en service en même temps ; ainsi, une batterie compense l'ensemble des récepteurs d'un atelier ou d'un groupe et dans ce cas, on a un seul appareillage de manœuvre.

Les **avantages** de ce type de compensation sont les suivants :

- le coût d'investissement est moins élevé que pour la compensation individuelle, à condition de bien connaître les courbes de charge pour ne pas provoquer de surcompensation car, une surcompensation permanente entraîne un vieillissement prématuré des appareils de l'atelier ;
- les conducteurs d'alimentation de l'atelier sont moins chargés ;
- comme la batterie de condensateurs a son propre organe de coupure, sa mise hors service est facile pendant la période de faibles charges sur le réseau public.

Les **inconvénients** sont les suivants :

- les câbles, en aval de la batterie, alimentant les appareils de l'atelier doivent être dimensionnés pour prendre en considération toute la puissance apparente demandée ;
- une protection des condensateurs de la batterie (fusibles, disjoncteur, etc.) doit être prévue pour question de sécurité, ce qui augmente le coût de la batterie ;
- il faut une maintenance périodique de la batterie.

▪ **Compensation globale**

Elle est utilisée dans le cas où une installation comporte de gros appareils électriques et un nombre limité de petits récepteurs. Ainsi, la production d'énergie réactive est groupée à un seul endroit, le plus souvent dans le poste électrique de toute l'installation. Il faut encore bien connaître les courbes de charge pour que la puissance réactive soit bien répartie sur la ligne principale de l'installation électrique et un réglage automatique de la puissance réactive est conseillé pour ne pas provoquer des surcompensations pendant les périodes de faibles charges du réseau public.

Les **avantages** de cette compensation sont les suivants :

- la batterie est généralement mieux utilisée, que dans les deux précédentes compensations ;
- les manœuvres de la batterie sont encore plus faciles que celles de la compensation par secteur ;
- si la batterie est constituée de plusieurs gradins à enclenchement automatique, le suivi de la courbe de charge de toute l'installation est meilleur.

Les **inconvénients** sont :

- les câbles d'alimentation de l'installation en aval de la batterie doivent être prévus pour faire transiter toute la puissance apparente ;
- un entretien périodique doit être effectué.

▪ **Compensation combinée**

Elle est utilisée dans le cas où l'installation comporte de petits et de gros appareils électriques. Une compensation individuelle est réalisée pour les appareils fonctionnant pendant de longues durées et une compensation par secteur ou globale pour les autres récepteurs.

L'**avantage** de ce type de compensation est que chaque ensemble d'appareils électriques est compensé de la manière la plus adaptée.

7.2. Compensation en MT :

La compensation en moyenne tension devient économiquement intéressante lorsque la puissance réactive à installer est supérieure à 600 kvar. En général, elle est centralisée, les batteries étant installées dans les postes de répartition HT/MT et raccordées au jeu de barres MT par l'intermédiaire d'un disjoncteur. Leur puissance est de plusieurs Mvar.

Sur les réseaux publics, la puissance maximale d'une batterie moyenne tension est de 9 Mvar.

Elle peut être fractionnée en gradins de condensateurs (voir **Fig.7**) mis en service successivement pour obtenir une compensation optimale en fonction de la courbe de charge journalière. Lorsqu'il en est ainsi, chaque gradin est manœuvré par son interrupteur spécialement prévu à cet effet. Les condensateurs des batteries peuvent être montés en double étoile, ou en étoile, ou en triangle et leur isolation à la masse correspond au niveau d'isolement du réseau. La commande de la batterie est assurée soit par des relais varmétriques, soit par des horloges. Dans quelques pays, la compensation en moyenne tension est décentralisée. On installe des petites batteries (l'équivalent d'un gradin) sur les poteaux du réseau.

L'**avantage** de ce système de compensation est que, lorsque les gradins ont des puissances supérieures à 600 kvar, le coût est moindre qu'en basse tension.

L'**inconvénient** est que ce mode de compensation ne soulage pas la partie du réseau en aval des condensateurs. L'enclenchement des gradins provoque, de plus, des à-coups de tensions. L'exploitation est plus délicate que celle des batteries à basse tension.

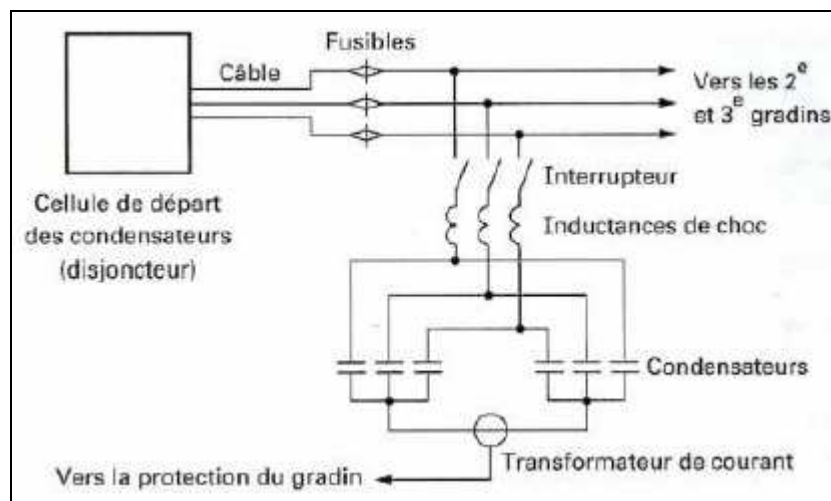


Fig.7. Système de compensation en MT avec une batterie à trois modules.

7.3. Compensation en HT :

La compensation en haute tension est utilisée pour soulager la charge des lignes HT et THT et pour améliorer la stabilité de la tension. Les batteries à haute tension sont toujours de puissance importante, environ quelques dizaines de Mvar, voire même une centaine de Mvar. Elles sont réalisées au moyen de condensateurs MT (avec l'isolement des bornes

correspondant au réseau haute tension), couplées en série-parallèle et montées sur des châssis isolés.

Les batteries sont raccordées au réseau à haute tension par l'intermédiaire d'un disjoncteur remplissant de plus la fonction d'interrupteur de manœuvre. Elles ne sont pas fractionnées comme en moyenne et basse tension.

Le coût de l'infrastructure (isolateurs et rack) et de l'appareillage (disjoncteur, dispositif de décharge ou de protection) constitue une fraction importante du coût global des batteries.

Exercices d'application

Exercices 01 :

Soit le réseau suivant :

Une installation triphasée, alimentée par un réseau triphasé équilibré 400V, 50 Hz, comporte deux récepteurs triphasés équilibrés inductifs dont les caractéristiques sont:

Récepteur 1: $P_1 = 12 \text{ kW}$; $Q_1 = 10 \text{ kvar}$

Récepteur 2: $P_2 = 15 \text{ kW}$; $Q_2 = 10 \text{ kvar}$

- 1- Calculer le facteur de puissance de cette installation en supposant que tous les récepteurs fonctionnent en même temps et en pleine puissance.
- 2- Calculez la puissance réactive des condensateurs qui permettrait de relever le facteur de puissance de cette installation à 0,93.
- 3- Calculez la capacité des condensateurs montés en triangle correspondant à cette puissance réactive de compensation.

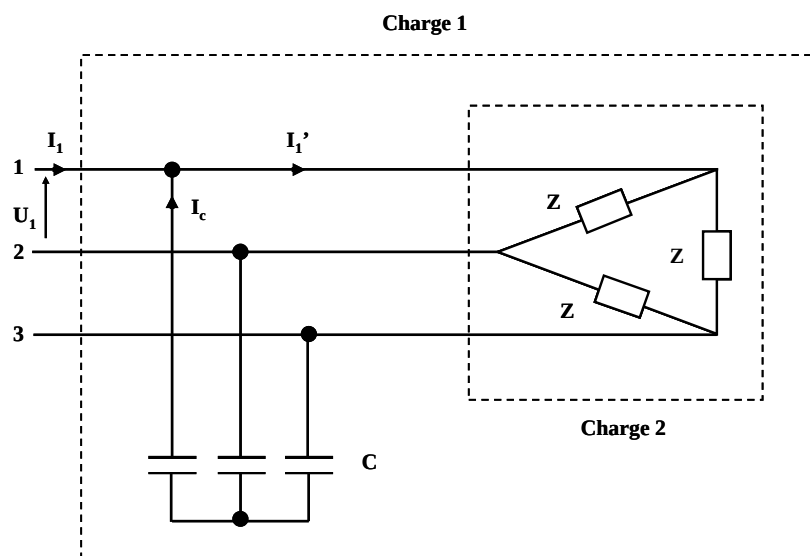
Exercices 02 :

Soit un transformateur de 630 kVA qui alimente déjà une charge de 450 kW avec un $\cos(\varphi) = 0,8$

- 1- peut-il alimenter en plus une charge de 150 kW avec un $\cos\varphi = 0,7$? donner la raison de votre réponse.
- 2- Déterminer la puissance réactive de compensation qui permettrait de conserver le transformateur.

Exercices 03 :

Soit le réseau suivant :



Avec :

Charge 1 ayant un facteur de puissance égale à 1

Charge 2 ayant un facteur de puissance égale à 0,8 inductif

$$|Z| = 10 \, \Omega \text{ et } \cos(\varphi) = 0,8$$

$$U_1 = 380V \text{ et } f = 50 \text{ Hz}$$

1- Calculer la puissance active P de l'installation.

2- Calculer la capacité C donnant un facteur de puissance unitaire du réseau 1.