

Chapitre 2 : Effets de l'énergie réactive sur la QEE

Une dégradation de la qualité de l'énergie électrique peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même de la destruction des équipements. Plusieurs paramètres influent sur cette qualité, dans cette partie nous étudierons, l'effet d'une consommation excessive de l'énergie réactive sur la qualité de l'énergie électrique.

Energie réactive : Définition, Enjeux et Economies

Les industries qui utilisent des machines à souder, des moteurs asynchrones ou des fours à arcs savent à quel point l'énergie réactive est un enjeu majeur, dans la qualité de l'énergie électrique.

Mais c'est quoi une énergie réactive ? En quoi elle est si mauvaise ? y a-t-il un moyen pour remédier à ça ?

Définition 1 : Une installation électrique, en courant alternatif, comprenant des récepteurs inductifs, c'est-à-dire des récepteurs dont l'intensité du courant est déphasée par rapport à la tension, absorbe une énergie totale que l'on appelle une énergie apparente (E_{pp}) qui s'exprime kVAh. Elle correspond à la puissance apparente S (kVA) et se répartit comme suit :

- P : puissance active (kW), elle est utilisable, après transformation par le récepteur, sous forme de travail (moteur) ou de chaleur (résistance),
- Q : puissance réactive (kVAR), elle sert en particulier à créer dans les bobinages des moteurs, transformateurs. Le champ magnétique sans lequel le fonctionnement serait impossible. Contrairement à la précédente, cette énergie est dite « improductive » pour l'utilisateur.

En réseau triphasé :

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} UI$$

$$\vec{S} = \vec{P} + \vec{Q}$$

En réseau monophasé, le terme $\sqrt{3}$ disparaît.

Définition 2

Facteur de puissance

Le facteur de puissance ou $\cos \varphi$ est égal au rapport de la puissance active sur la puissance apparente :

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

Il permet d'identifier facilement les récepteurs plus ou moins consommateurs d'énergie réactive.

- Un facteur de puissance $\cos \varphi = 1$ ne conduira à aucune consommation d'énergie réactive (circuit résistif).
- Un facteur de puissance inférieur à 1 conduit à une consommation d'énergie réactive d'autant plus importante que le circuit est plus inductif (climatiseurs, ...).

Il diffère d'une entreprise à une autre, selon les récepteurs installés et la manière dont ils sont utilisés : à vide, en charge,

Les appareils de comptages d'énergie dans les entreprises à fortes consommation d'énergie active et réactive. Généralement le terme $\tan \varphi$ est utilisé.

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

A l'inverse de $\cos \varphi$, on s'aperçoit facilement que la valeur de la $\tan \varphi$ doit être la plus petite possible afin d'avoir le minimum de consommation d'énergie réactive.

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + (\tan \varphi)^2}}$$

Exemple :

$$P = 4 \text{ kW} \quad \cos \varphi = 0.7 \quad \tan \varphi = 1.02$$

$$P = 4 \text{ kW} \quad \cos \varphi = 0.94 \quad \tan \varphi = 0.36$$

Exemples de quelques facteurs de puissance des principaux récepteurs

Récepteurs		$\cos \varphi$	$\tan \varphi$
Moteur asynchrone	0%	.17	5.8
	25%	.55	1.52
	50%	.73	.94
	75 %	.80	.75
	100%	.85	.62
Fours à arc		.8	.75
Redresseur de puissance à thyristors		.4 à .8	2.25 à .75

Remarque : les moteurs à vide consomment beaucoup d'Énergie réactive comparativement à la puissance active.

Avantages d'un bon facteur de puissance

Un bon facteur de puissance c'est :

$$\cos \varphi \geq 0.93$$

$$\text{ou } \tan \varphi \leq 0.4$$

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation d'Énergie réactive.
- La limitation des pertes d'énergie active dans toute la chaîne de transport d'Énergie électrique.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire

Conséquence de l'énergie réactive pour l'utilisateur

Les points négatifs de la circulation de cette énergie dite « improductive » mais nécessaire sont nombreux ; par exemple :

- Surcharge de courant dans les transformateurs.
- Câbles d'alimentation qui chauffent plus.
- Pertes Joules supplémentaires.
- Chute de tension.
- Obligation de payer les pénalités.
- Baisse de la qualité générale de l'installation (durée de vie des récepteurs non préservées).
- Surdimensionnement des installations.

Compensation de la perte d'énergie réactive (amélioration du facteur de puissance $\cos \varphi$)

La meilleure solution consiste à installer des condensateurs en batterie le plus près possible des sources de production d'énergie réactive. Ces condensateurs vont faire baisser l'énergie réactive en améliorant le facteur de puissance ($\cos \varphi$) des récepteurs.

- Dans certaines entreprises, en fonction de la consommation de cette énergie réactive, on opte pour une implantation par secteur, dans un atelier ou une ligne de production par exemple.
- Les batteries de condensateurs offrent une compensation de deux types : fixe ou automatique :
 - 1- la première est utilisée lorsque la puissance réactive est faible. Les condensateurs peuvent être activés soit par interrupteur, soit par contacteur ;

- 2- quant à la compensation automatique, elle se fait via un certain nombre de gradins (étages), correspondant chacun à une fraction des condensateurs. En fonction de la puissance réactive à réguler, les étages s'activent automatiquement.

De cette façon, on réduit les pertes d'énergie active, on maximise le rendement des installations et des équipements tout en améliorant la qualité de vie (préserver l'environnement en minimisant le carbone)

Remarque1 : la compensation individuelle est la solution idéale pour les gros consommateurs, puisque l'énergie réactive est produite là elle est consommée et en fonction de la demande.

Remarque2 : quand la compensation est accompagnée d'un filtrage des harmoniques, l'efficacité des installations est assurée.

Rappel sur le condensateur :

En courant alternatif, l'impédance d'un condensateur est défini par :

$$\overline{Z}_c = \frac{1}{jC\omega} \quad Z_c = \frac{1}{C\omega}$$

La puissance réactive produite par un condensateur de capacité C sous une tension U est :

$$Q = UI \sin \varphi = UI \quad (\sin \varphi = 1)$$

$$Q = \frac{U^2}{Z} = U^2 C \omega \quad I = \frac{U}{Z}$$

On voit bien que la quantité d'énergie réactive produite par un condensateur est proportionnelle au carré de la tension et à la valeur de sa capacité.

Exemple1 :

A) Un circuit électrique est constitué d'une bobine dont la résistance $R = 3\Omega$ et $L = 30 \text{ mH}$. Cette bobine est alimentée par une tension sinusoïdale de valeur efficace $V = 230 \text{ V}$ et de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$.

- 1) Calculez P,Q,I et $\cos\varphi$

$$Z_B = \sqrt{R^2 + (L\omega)^2} = \sqrt{3^2 + (314 * 0.03)^2} \\ = 9.886 \Omega$$

$$I = \frac{U}{Z_B} = \frac{230}{9.886} = 23.26 \text{ A}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z_B} = \frac{3}{9.886} = 0.303 \quad \sin \varphi = 0.952$$

$$P = UI \cos \varphi = 230 * 23.26 * .303 = 1621 W$$

$$Q = UI \sin \varphi = 230 * 23.26 * .952 = 5093 VAR$$

$$S = UI = 230 * 23.26 = 5349.8 VA$$

B) Afin de diminuer l'intensité du courant absorbé, on place en parallèle un condensateur avec la bobine de capacité $C = 285 \mu F$.

Calculez : I' , Q' , $\cos'(\varphi)$

- **Calcul de I'**

En notation complexe :

$$\overline{I}_{bob} = \frac{U}{Z_{bob}} \quad , \quad \overline{I}_{cond} = \frac{U}{Z_{cond}}$$

$$\overline{I'} = \overline{I}_{bob} + \overline{I}_{cond}$$

$$\overline{Z}_{bob} = 3 + j9.42 \Omega \quad \overline{Z}_{cond} = -j11.17 \Omega$$

$$\overline{I}_{bob} = \frac{230}{3+j9.42} = 7.06 - j22.16 A$$

$$\overline{I}_{cond} = \frac{230}{+j11.17} = +j20.6 A$$

$$\overline{I'} = 7.06 - 22.16 + j20.6$$

$$\overline{I'} = 7.06 - j1.57 A$$

$$I' = 7.23 A$$

- **Calcul de Q'**

$$Q_c = U^2 C \omega = 230 * 285 * 314 * 10^{-6} = 4734 VAR$$

$$Q' = Q - Q_c = 5093 - 4734 = 359 VAR$$

- **Calcul de $\cos \varphi'$**

$$P = U * I' * \cos \varphi' \quad \Rightarrow \quad \cos \varphi' = \frac{P}{UI'} = \frac{1621}{230 * 7.23} = 0.97$$

- On voit bien l'intérêt de la compensation de l'énergie réactive, en rajoutant un condensateur en parallèle à la bobine.
- Le courant est passé de 23.26 A à 7.23 A
- La puissance réactive provenant du réseau est passée de 5093 VAR à 359 VAR.
- Le facteur de puissance de 0.303 à 0.97.
- Et tout ça pour la même puissance active transférée du réseau vers la charge.

Exemple 2 : Dans les systèmes triphasés, nous avons à choisir entre 3 condensateurs montés en triangle ou en étoile.

Voyons ça à partir d'un exemple.

- Dans un montage étoile, pour une tension composée U :

$$Q_{c1} (d'unephase) = \left(\frac{U}{\sqrt{3}}\right)^2 * C * \omega = \frac{U^2}{3} * C * \omega$$

$$Q_c (3 phases) = 3 * \frac{U^2}{3} * C * \omega = U^2 * C * \omega$$

- Dans un montage triangle, pour la même tension composée U :

$$Q_{c1} (d'unephase) = U^2 * C * \omega$$

$$Q_c (3 phases) = 3 * U^2 * C * \omega$$

En conclusion : dans les systèmes triphasés les 3 condensateurs doivent être montés en triangle et en parallèle avec la charge.

Exemple 3 : Facteur de puissance d'une installation

Un réseau triphasé 400 V/ 50 H alimente une charge triphasée équilibrée. La puissance active est P = 400 kW. Le facteur de puissance est $\cos \varphi_1 = .91$.

- 1) Calculez alors l'intensité du courant en ligne ainsi que la puissance réactive Q_1 consommée, en déduire la puissance apparente S_1 .

$$I_1 = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi_1} = \frac{400 * 10^3}{\sqrt{3} * 400 * 0.91} \approx 634 \text{ A}$$

$$Q_1 = P * \tan \varphi_1 = 400 * 0.4556 \approx 182 \text{ kVAR}$$

$$S = \sqrt{3} * U * I = \sqrt{3} * 400 * 634 \approx 439 \text{ kVA}$$

1) On souhaite obtenir un nouveau facteur de puissance $\cos \varphi_2 = 0.93$.

- Quelle est la nouvelle puissance active P_2 consommée.

$P_2 = P = 400 \text{ kW}$, les condensateurs ne consomment pas de puissance active.

- Calculez les nouvelles valeurs de la puissance apparente S_2 de l'installation, de l'intensité I_2 du courant en ligne et de la puissance réactive Q_2 .

$$S_2 = \frac{P_2}{\cos \varphi_2} = \frac{400}{0.93} = 430 \text{ kVA}$$

$$Q_2 = P_2 * \tan \varphi_2 = 400 * 0.395 = 158 \text{ kVAR}$$

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3} * U} = \frac{430000}{\sqrt{3} * 400} = 620 \text{ A}$$

- Déduisez la valeur de la puissance réactive Q_c fournie par la batterie des condensateurs.

$$Q_c = Q_2 - Q_1 = 158 - 182 = -24 \text{ kVAR}$$

- Déterminez la capacité C par phase des condensateurs couplés en triangle.

$$Q_c = -3 * C * \omega * U^2$$

$$\text{Soit : } C = - \frac{Q_c}{3 * \omega * U^2} = \frac{-24 * 10^3}{3 * 314 * 400^2}$$

$$C \approx 160 \mu\text{F}$$

Exercice

Une installation triphasée 400V/ 50 Hz,

Absorbe une puissance active de 12 kW et une puissance apparente $S = 15$ kVA.

Calculez :

- Le facteur de puissance de l'installation
- La puissance réactive consommée
- La puissance réactive nécessaire pour amener le facteur de puissance à 0.94.
- La capacité d'une phase de l'ensemble de compensation (condensateurs montés en triangle)