

Problèmes posés par le facteur de puissance

Une installation alimentant une usine d'industrie métallurgique peut être représentée par :

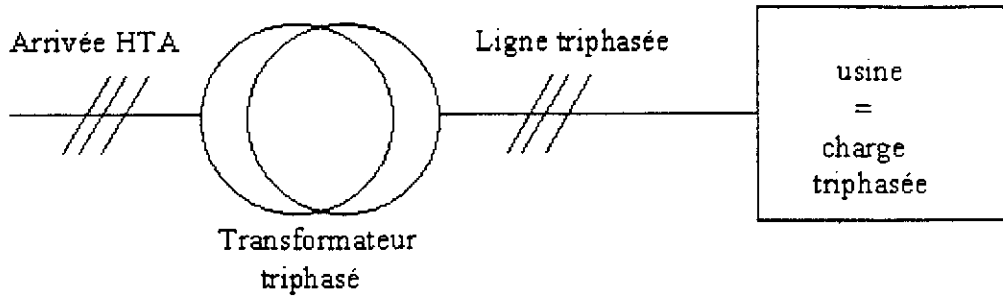


Figure 1

Les installations électriques de l'usine constituent une charge triphasée équilibrée **linéaire**.

Les tensions sinusoïdales alimentant le primaire du transformateur forment un système triphasé équilibré direct.

L'étude proposée comporte trois parties indépendantes :

1^{ère} partie : étude d'un transformateur triphasé

2^{ème} partie : compensation de puissances réactives par une batterie triphasée de condensateurs

3^{ème} partie : étude d'un modèle monophasé de compensateur statique

1. Etude du transformateur triphasé

Les caractéristiques du transformateur triphasé servant à l'alimentation de l'usine sont :

- puissance apparente secondaire nominale : $S_{2n} = 250 \text{ kVA}$

- tension composée primaire nominale : $U_{1n} = 20 \text{ kV}$ à la fréquence

$f = 50 \text{ Hz}$

- tension composée secondaire nominale : $U_{2n} = 400 \text{ V}$

- couplage : Dy_n

Des essais ont été réalisés :

- essai à vide, sous la tension $U_{10} = U_{1n}$:

puissance absorbée au primaire : $P_{10} = 0,65 \text{ kW}$

tension composée secondaire : $U_{20} = 410 \text{ V}$

- essai en court-circuit, sous la tension $U_{1cc} = 4\%$ de U_{1n}

puissance absorbée au primaire : $P_{1cc} = 3,25 \text{ kW}$

intensité du courant de ligne secondaire : $I_{2cc} = I_{2n}$

1.1. Déterminer la valeur efficace nominale I_{2n} de l'intensité du courant de ligne secondaire.

1.2. Déterminer le rapport de transformation à vide $m = \frac{U_{20}}{U_{10}}$.

1.3. On souhaite déterminer le schéma équivalent par phase ramené au secondaire, conformément à la figure 2.

1.3.1. A l'aide de l'essai en court-circuit réalisé sous tension primaire réduite, déterminer Z_s .

1.3.2. Que représente la puissance P_{1cc} absorbée dans l'essai en court-circuit ?

1.3.3. En déduire R_s , puis X_s .

Dans la suite, on prendra : $R_s = 8,3 \text{ m}\Omega$ et $X_s = 25 \text{ m}\Omega$.

1.4. On imagine pour l'instant un fonctionnement du transformateur, alimenté sous sa tension primaire nominale, qui débite une intensité $I_2 = I_{2n}$ en alimentant directement une charge triphasée équilibrée de nature inductive, caractérisée par un facteur de puissance de 0,80.

1.4.1. Quelle est la tension disponible entre phases aux bornes de la charge ?

1.4.2. Quel est alors le rendement du transformateur ?

1.5. En vu d'un éventuel accroissement de la puissance installée, il est envisagé de rajouter un deuxième transformateur triphasé fonctionnant en parallèle avec le premier, ce qui rend indispensable la connaissance de l'indice horaire, noté H , du transformateur déjà installé. (cf. figure 3). Déterminer H .

2. Etude de la charge

On suppose que la charge constituée par l'usine est alimentée sous une tension de valeur efficace constante $U = 400 \text{ V}$, de fréquence $f = 50 \text{ Hz}$, et qu'elle absorbe une puissance active constante $P = 150 \text{ kW}$, une puissance réactive Q positive, avec un facteur de puissance très variable, évoluant entre 0,4 et 1 (cf. figure 4).

On note P_S et Q_S les puissances fournies par la source triphasée.

2.1. Entre quelles valeurs I_{\min} et I_{\max} évolue le courant de ligne ?

2.2) Pour quelle valeur du facteur de puissance de la charge atteint-on $I = 360 \text{ A}$?

A quelle puissance apparente de la source cela correspond-il ?

Un transformateur de 250 kVA convient-il pour tous les facteurs de puissance possibles, compris entre 0,4 et 1 ?

Lorsque le facteur de puissance de la charge est faible, on branche en parallèle une batterie de 3 condensateurs identiques, de capacité C , montés en triangle (cf. figure 5).

On note P_S et Q_S les puissances fournies par la source triphasée, P_{ct} et Q_{ct} les puissances absorbées par la batterie de condensateurs et P et Q les puissances absorbées par la charge.

2.3) Pour un facteur de puissance de la charge de 0,40 on veut que $I_S = 240 \text{ A}$.

Etablir un bilan de puissances. En déduire la valeur de C .

3. Etude d'un compensateur statique monophasé

Pour assurer un meilleur réglage de la compensation de l'énergie réactive échangée entre une source et une charge, nous allons étudier un compensateur statique monophasé, dont le schéma de principe est donné figure 6.

Dans cette partie, toute l'étude est faite en monophasé avec comme grandeurs :

- tension simple $v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$ à la fréquence $f = 50$ Hz, avec $V = 230V$;
- charge linéaire consommant la puissance active constante $P_0 = 50$ kW et la puissance réactive Q_0 positive, avec un facteur de puissance variable entre 0,4 et 1.
- On note φ_0 le déphasage entre le courant absorbé par la charge et la tension v .
- La source monophasée fournit les puissances P_S et Q_S ;
- Le condensateur C consomme P_c et Q_c ;
- L'ensemble « gradateur-bobine L » consomme P_L et Q_L .

3.1. Nous allons tout d'abord étudier le fonctionnement du gradateur :

Le gradateur est constitué de deux thyristors supposés parfaits, T_h et T_h' montés tête-bêche, en série avec une inductance pure L (cf. figure 7). L'ensemble est alimenté sous la tension $v(t)$, délivrée par la source. T_h et T_h' sont commandés de manière périodique : T_h est commandé à la fermeture sur la demi alternance positive de la tension v , avec un angle de commande α compté à partir de 0, et compris entre $\frac{\pi}{2}$ et π (α en rad). T_h' est commandé de la même manière sur la demi alternance négative de la tension v . (cf. document-réponse n°1)

Il est rappelé que si t est la variable temporelle de $v(t)$, θ est la variable angulaire de la même grandeur v avec : $\theta = \omega t$

$$v(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ ou } v(\theta) = V\sqrt{2} \sin(\theta)$$

3.1.1. Pour $\alpha = \frac{3\pi}{4}$: $i_L(t)$ a l'allure donnée sur la figure du bas du document-réponse n°1.

Préciser sur la figure du haut du document-réponse n°1 l'intervalle de conduction de T_h et de T_h' .

Expliquer pourquoi T_h cesse de conduire.

Tracer l'allure du fondamental de $i_L(t)$, noté $i_{Lf}(t)$, sur la figure du bas du document-réponse n°1.

3.1.2. La valeur instantanée du fondamental de $i_L(t)$, $i_{Lf}(t)$, a pour expression en fonction de α :

$$i_{Lf}(t) = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi L\omega} \left(\frac{\sin 2\alpha}{2} + \pi - \alpha \right) \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

En déduire l'expression de la puissance active P_L et de la puissance réactive Q_L absorbée par l'ensemble « gradateur-bobine » en fonction de α .

3.2. Bilan des puissances (cf. figure 6) :

3.2.1. Quelles sont les puissances actives P_C et P_L consommées respectivement par le condensateur et l'ensemble « gradateur-bobine » ?

Donner la relation entre P_S et P_0 .

3.2.2. Faire le bilan des puissances réactives, en donnant la relation entre Q_S , Q_C , Q_L et Q_0 .

3.2.3. En déduire que la relation générale entre P_0 , φ_0 , V , C , L , α et ω , quand $Q_S = 0$, est :

$$P_0 \tan \varphi_0 + \frac{2V^2}{\pi L \omega} \left(\frac{\sin 2\alpha}{2} + \pi - \alpha \right) - V^2 C \omega = 0$$

3.2.4. On a $Q_L = 0$ lorsque $\alpha = \pi$. On réalise ce réglage pour un facteur de puissance de la charge de 0,40.

En déduire la valeur de la capacité C du condensateur pour que $Q_S = 0$.

La valeur de la capacité reste maintenant constante et égale à $C = 6,9 \text{ mF}$.

3.2.5. Dans le cas d'une charge ayant un facteur de puissance de 1, on désire obtenir

$Q_S = 0$, avec le réglage $\alpha = \frac{\pi}{2}$.

En déduire la valeur de L .

3.2.6. Les courbes donnant la puissance réactive Q_S fournie par le réseau, à $P_0 = \text{constante}$, en fonction du facteur de puissance (f_p) de la charge et du réglage du gradateur (α) sont données sur le document-réponse n°2.

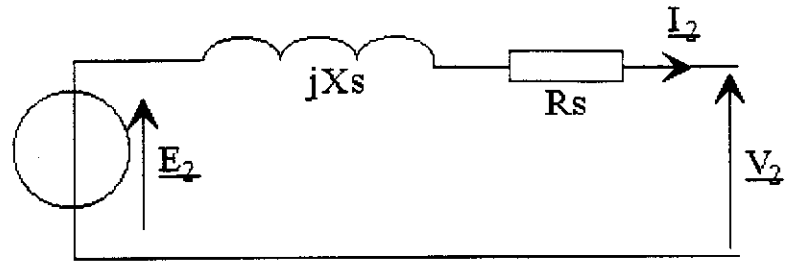
Sur le document-réponse n°2, placer les 3 points suivants :

Point A pour le cas du 3.2.4 ;

Point B pour le cas du 3.2.5 ;

Point C pour un réglage de $Q_S = 0$ si $f_p = 0,80$.

A quelle valeur de α faut-il régler le gradateur pour le point C ?



Légende : en valeur efficace $E_2 = m V_1$
 où V_1 est la valeur efficace de la tension simple primaire.

Figure 2

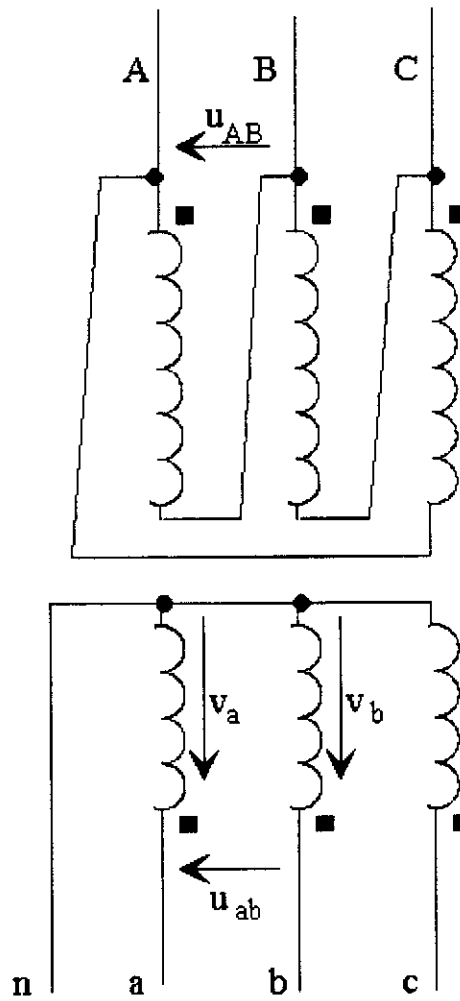


Figure 3

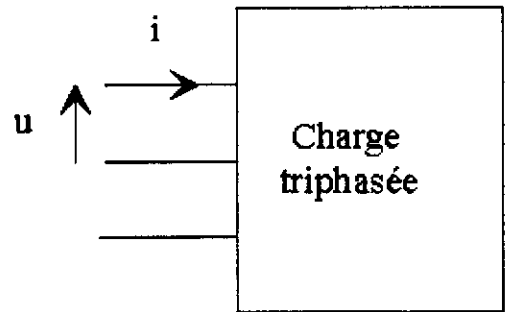


Figure 4

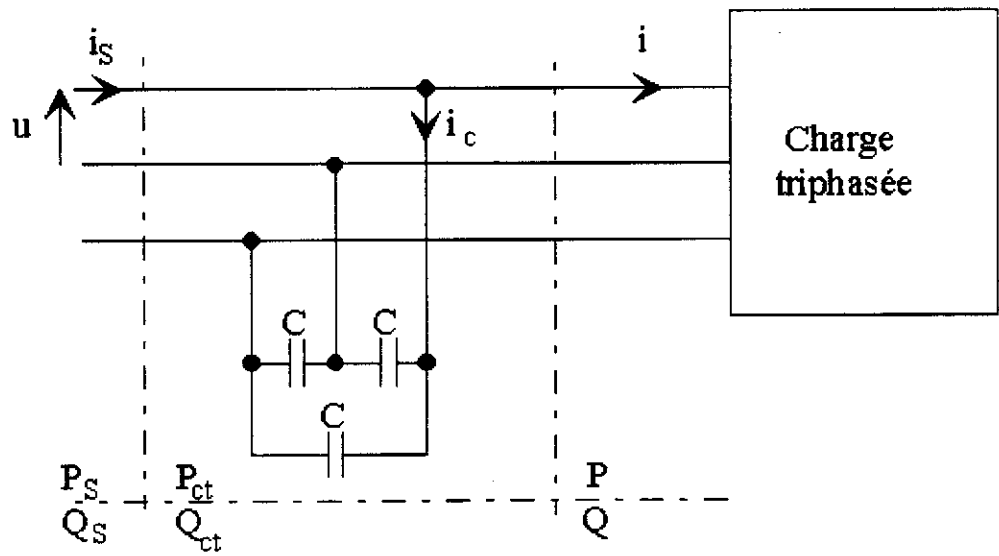


Figure 5

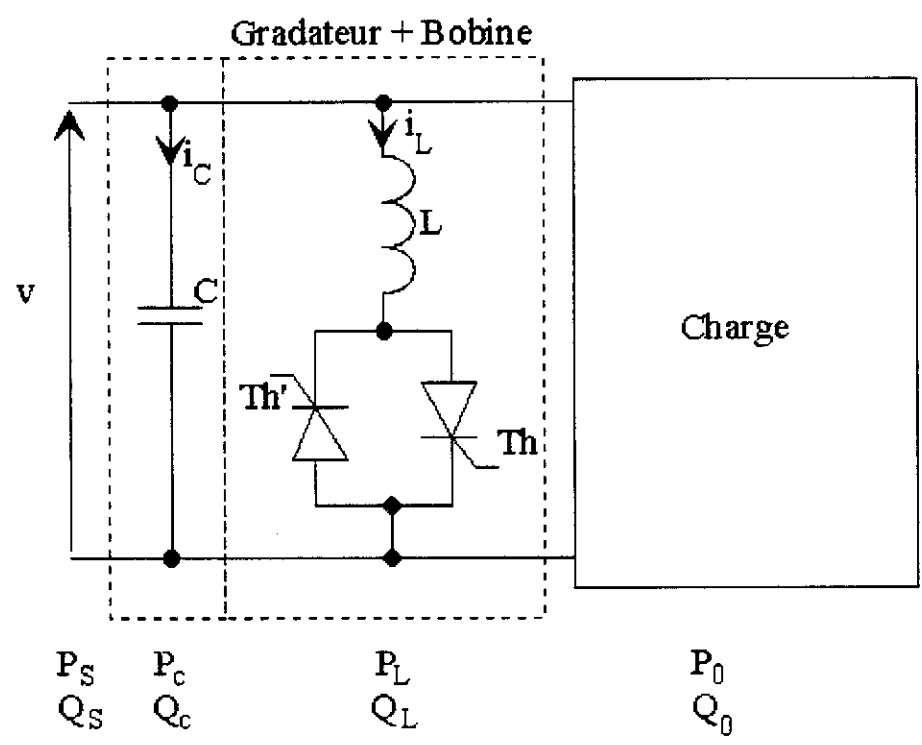


Figure 6

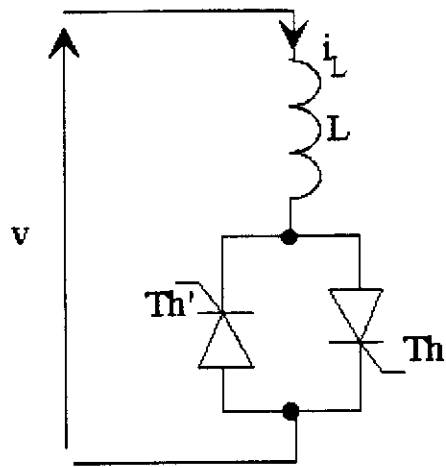


Figure 7

Document-réponse n°2

