

CHARGE TRIPHASÉE CONNECTÉE AU RÉSEAU

COMPENSATION DE LA PUISSANCE RÉACTIVE

1. OBJECTIF

Il s'agit d'étudier les puissances ainsi que les variations temporelles des grandeurs électriques d'une charge triphasée connectée sur le réseau. Cette charge est composée d'une partie résistive et d'une partie inductive de sorte à créer un déphasage entre la tension appliquée à la charge et le courant absorbé. La compensation de puissance réactive par l'utilisation d'une batterie de condensateurs placée en tête d'installation sera abordée dans ce chapitre. En complément de l'étude menée, nous analyserons l'influence des harmoniques de tension sur un système compensé.

2. RAPPELS THEORIQUES

2.1. Impédance complexe des dipôles élémentaires

En régime sinusoïdal, connaissant l'expression de la tension \underline{V} appliquée à un dipôle d'impédance \underline{Z} , il est possible de déterminer le courant \underline{I} traversant ce dipôle par la relation (1) en considérant le vecteur tension comme référence.

$$\underline{I} = \frac{\underline{V}}{\underline{Z}} = \frac{V}{Z e^{j\varphi}} = I e^{-j\varphi} \quad (1)$$

où V , Z et φ représentent respectivement la valeur efficace de la tension aux bornes du dipôle, le module et l'argument du dipôle soumis à cette tension.

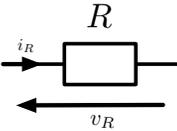
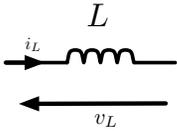
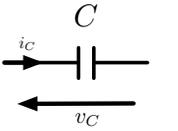
Si le dipôle considéré est une résistance, une inductance ou un condensateur, nous obtenons pour l'expression des tensions, des courants et des puissances, les relations données dans le tableau 1.

Les puissances totales P_T , Q_T et S_T d'un circuit électrique composé de plusieurs dipôles s'obtiennent en appliquant la méthode de Boucherot. Par conséquent, pour un circuit comportant « n » dipôles, les puissances se calculent à partir des relations suivantes :

$$P_T = \sum_{j=1}^n P_j \quad (2) \quad Q_T = \sum_{j=1}^n Q_j \quad (3)$$

$$S_T = \sqrt{P_T^2 + Q_T^2} \quad (4)$$

Tableau 1 : Tension, courant et puissances dans un dipôle.

		
$Z_R = R$ $\underline{V}_R = Z_R \underline{I}_R = R \underline{I}_R$ $\varphi_R = 0$	$Z_L = jL\omega$ $\underline{V}_L = Z_L \underline{I}_L = jL\omega \underline{I}_L$ $\varphi_L = \pi/2$	$Z_C = \frac{1}{jC\omega}$ $\underline{V}_C = Z_C \underline{I}_C = \frac{\underline{I}_C}{jC\omega}$ $\varphi_C = -\pi/2$
$P_R = V_R I_R = R I_R^2 = \frac{V_R^2}{R}$ $Q_R = 0$	$P_L = 0$ $Q_L = V_L I_L = L\omega I_L^2 = \frac{V_L^2}{L\omega}$	$P_C = 0$ $Q_C = -V_C I_C = -V_C^2 C\omega = -\frac{I_C^2}{C\omega}$

Le facteur de puissance F_p et le facteur de déplacement $\cos(\varphi)$ de l'installation sont égaux en régime sinusoïdal et se calculent grâce à la relation (5).

$$F_p = \cos(\varphi) = \frac{P_T}{S_T} \quad (5)$$

Dans cette étude, où nous nous attardons sur l'étude d'une charge triphasée alimentée par une source de tension triphasée, il est important de différencier la source de la charge. L'une comme l'autre peuvent être équilibrée ou non. Dans notre cas d'étude, nous considérerons les deux comme étant équilibrées.

2.2. Source de tension triphasée équilibrée

Les tensions, dites « simples », d'une source de tensions triphasées équilibrées peuvent se mettre sous la forme :

$$v_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t) \quad (6)$$

$$v_2(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (7)$$

$$v_3(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (8)$$

A partir de ces tensions simples, nous pouvons déterminer l'expression des tensions composées appliquées à la charge. Ces tensions sont données par les équations (9), (10) et (11).

$$u_{12}(t) = v_1(t) - v_2(t) = U\sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) \quad (9)$$

$$u_{23}(t) = v_2(t) - v_3(t) = U\sqrt{2} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

$$u_{31}(t) = v_3(t) - v_1(t) = U\sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{5\pi}{2}\right) \quad (11)$$

avec $U = \sqrt{3}V$.

La représentation de ces tensions dans un schéma électrique comportant une charge triphasée alimentée par une source triphasée est donnée à la figure 1.

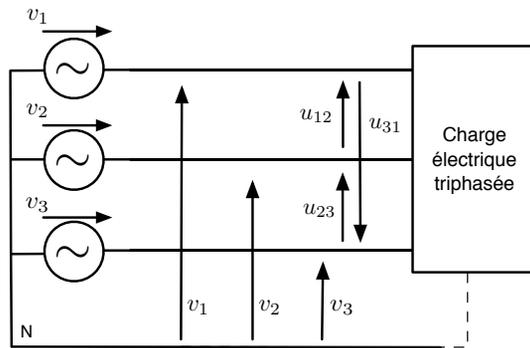


Figure 1 : Système triphasé équilibré en tension.

2.3. Charge triphasée équilibrée

La source triphasée permet d'alimenter une charge triphasée représentée par ses impédances complexes \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3 . Cette charge est considérée dans notre étude comme étant équilibrée :

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3 = \underline{Z} \quad (12)$$

Il convient de différencier deux couplages possibles de la charge :

- le couplage étoile ;
- le couplage triangle.

2.3.1. Couplage étoile

La charge triphasée peut être couplée en étoile sur le réseau triphasé comme nous le montre la figure 2. Dans ce cas, chaque dipôle de la charge est soumis à la tension simple du réseau. La valeur efficace I_c du courant circulant dans le dipôle \underline{Z} est égale à la valeur efficace I du courant fourni par la source triphasée.

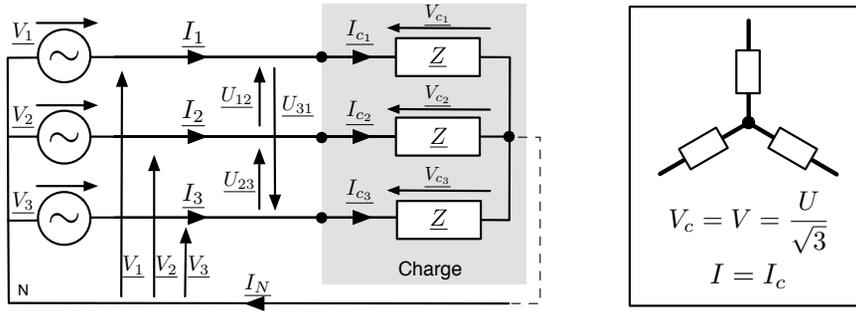


Figure 2 : Charge triphasée couplée en étoile (neutre non relié).

Le calcul des puissances active P , réactive Q et apparente S d'une charge triphasée couplée en étoile alimentée par un système triphasé équilibré de tensions s'obtient en appliquant les relations (13), (14) et (15).

$$P = 3VI \cos(\varphi) = \sqrt{3}UI \cos(\varphi) \quad (13)$$

$$Q = 3VI \sin(\varphi) = \sqrt{3}UI \sin(\varphi) \quad (14)$$

$$S = 3VI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (15)$$

2.3.2. Couplage triangle

Dans le cas où la charge triphasée est couplée en triangle sur le réseau triphasé (figure 3), chaque dipôle de la charge est soumis à la tension composée du réseau. La valeur efficace I_c du courant circulant dans le dipôle Z est égale à la valeur efficace I du courant fourni par la source triphasée divisée par $\sqrt{3}$.

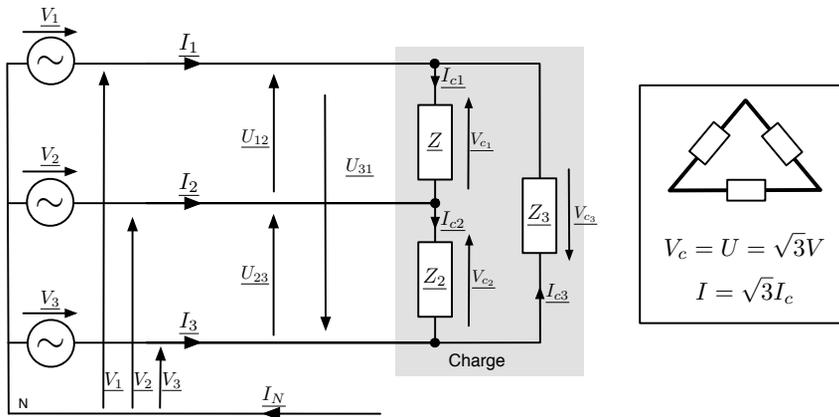


Figure 3 : Charge triphasée couplée en triangle.

Le calcul des puissances active P , réactive Q et apparente S d'une charge triphasée couplée en triangle et alimentée par un système triphasé équilibré de tensions s'obtient en utilisant les relations (16), (17) et (18).

$$P = 3UI_c \cos(\varphi) = \sqrt{3}UI \cos(\varphi) \quad (16)$$

$$Q = 3UI_c \sin(\varphi) = \sqrt{3}UI \sin(\varphi) \quad (17)$$

$$S = 3UI_c = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (18)$$

3. ETUDE EXPERIMENTALE

3.1. Description du banc expérimental

On se propose d'étudier les tensions, courants, déphasages et puissances mis en jeu dans le circuit électrique proposé à la figure 4. Ce circuit est composé de deux récepteurs connectés en parallèle, une charge résistive triphasée connectée en étoile et une charge inductive triphasée, elle aussi connectée en étoile. Un interrupteur K permet de connecter la batterie de condensateurs, représentée par trois condensateurs C connectés en triangle, placée en tête d'installation.

3.2. Matériel utilisé

- Trois résistances de $210\Omega - 230V$ couplées en étoile ;
- trois inductances de $530mH - 230V$ couplées en étoile ;
- trois condensateurs de $4,65\mu F - 400V$ couplés en triangle.

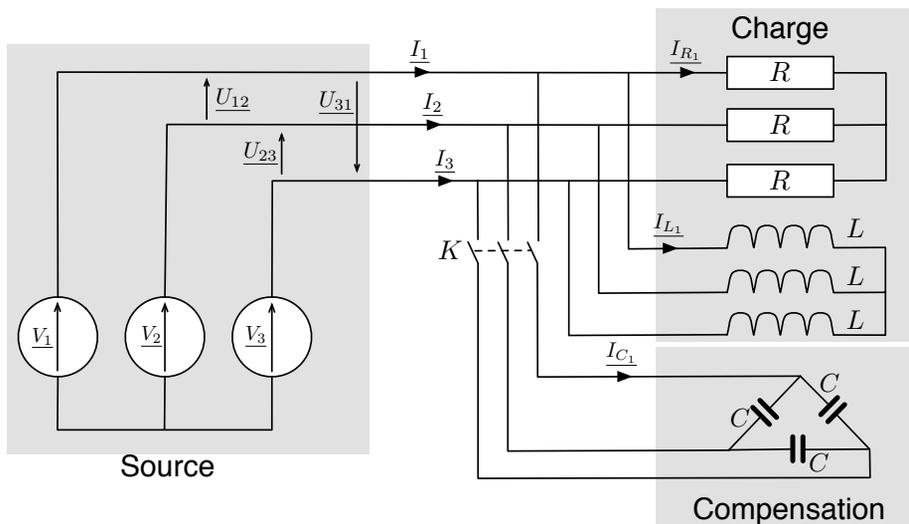


Figure 4 : Schéma du banc expérimental.

3.3. Etude sans compensation (K ouvert)

La figure 5 nous donne l'évolution temporelle des tensions composées $u_{12}(t)$, $u_{23}(t)$ et $u_{31}(t)$, la tension $v_1(t)$ étant prise comme référence. Le déphasage des tensions composées par rapport à la tension simple $v_1(t)$ est conforme aux équations (9), (10) et (11).

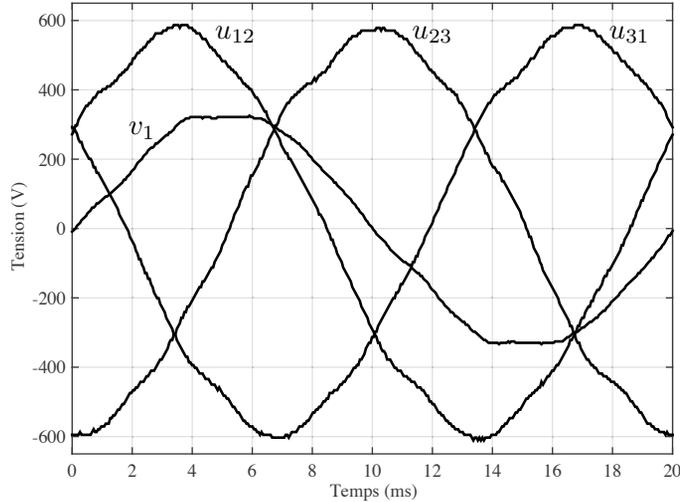


Figure 5 : Mesures de la tension simple $v_1(t)$ et des tensions composées $u_{12}(t)$, $u_{23}(t)$ et $u_{31}(t)$.

La mesure de la valeur efficace de la tension simple, du courant de ligne, des puissances et du facteur de puissance de l'installation, lorsque la valeur efficace V des tensions simples de la source triphasée vaut 230V est donnée au tableau 2.

V (V)	230	P (W)	727
I (A)	1,72	Q (Var)	951
$\cos(\varphi)$	0,608	S (VA)	1197
$\tan(\varphi)$	1,308	F_P	0,607

Les mesures obtenues sont conformes aux équations données dans la partie théorique pour un couplage étoile des résistances et des inductances. Le déphasage théorique entre la tension simple et le courant dans une ligne est égal à $51,6^\circ$ (19) ce qui est proche de la mesure faite sur la figure 6 ($3,04\text{ms} \rightarrow 54,7^\circ$).

$$\underline{Z}_{eq} = \frac{\underline{Z}_R \underline{Z}_L}{\underline{Z}_R + \underline{Z}_L} = \frac{jRL\omega}{R + jL\omega} = 130e^{j51,6} \quad (19)$$

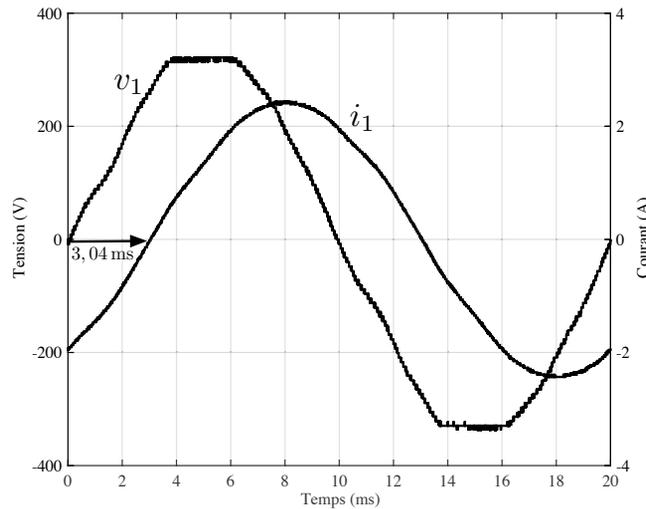


Figure 6 : Mesures de la tension simple $v_1(t)$ et du courant $i_1(t)$ fournis par la source triphasée – K ouvert

La différence peut s'expliquer par le fait que la valeur des dipôles qui composent la charge n'est pas exactement égale à la valeur indiquée sur leur plaque signalétique (par exemple, la résistance R , de valeur théorique 210Ω , présente une valeur réelle après mesure à chaud de 212Ω). Le fait que la tension d'alimentation ne soit pas purement sinusoïdale peut aussi mener à une erreur sur la mesure graphique de l'angle de déphasage. Nous donnons à la figure 7, la forme d'onde de la tension $v_1(t)$ et des courants $i_{R1}(t)$ et $i_{L1}(t)$ sans compensation (K ouvert). Comme nous pouvons le remarquer, le déphasage du courant circulant dans la phase 1 de la résistance par rapport à la tension simple $v_1(t)$ du réseau est nul alors que le courant circulant dans la phase 1 de la bobine présente un déphasage d'environ 90° par rapport à cette même tension. Nous retrouvons donc les déphasages donnés dans le tableau 1 pour une charge résistive et une charge inductive.

3.4. Etude avec compensation (K fermé)

Si l'on considère que la puissance active consommée par une installation électrique reste fixe et que la puissance réactive augmente (alimentation de charges inductives), la valeur efficace du courant absorbé par l'ensemble de l'installation augmente. En effet, si la puissance P et la tension V (ou U) restent constantes, le facteur de puissance diminue ((13) ou (16)). L'augmentation de cette valeur efficace entraîne des pertes supplémentaires dans les lignes de distribution (proportionnelles à la valeur efficace du courant au carré). Pour limiter ces pertes et éviter un transport de puissance réactive trop important sur les lignes de distribution, le fournisseur d'énergie impose aux consommateurs un facteur de puissance supérieur ou égal à 0,93 ($\tan(\varphi) < 0,4$) à l'entrée de son installation électrique. Le fait de ne pas respecter cette obligation entraîne pour le consommateur une facture énergétique plus importante.

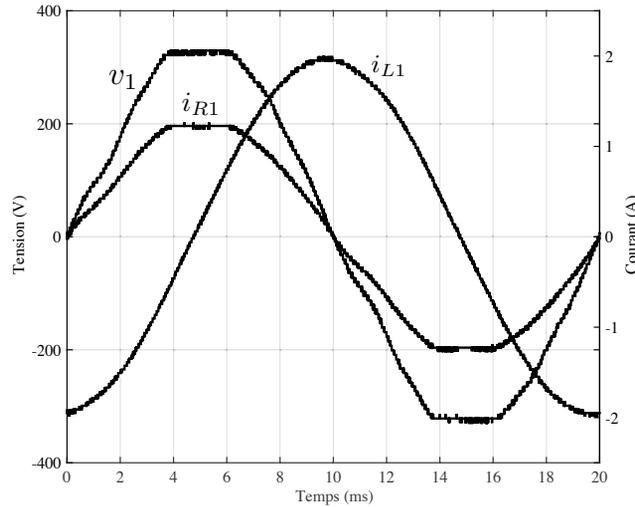


Figure 7 : Mesures de la tension $v_1(t)$ et des courants $i_{R_1}(t)$ et $i_{L_1}(t)$
K ouvert.

Si l'installation concernée présente un rapport $Q/P < 0,4$, il est nécessaire de mettre en place des moyens appropriés pour rétablir un rapport entre ces deux puissances conforme à la demande du fournisseur d'énergie. L'un des moyens les plus utilisés dans l'industrie réside dans l'utilisation d'une (ou plusieurs) batteries de condensateurs connectées en tête d'installation (figure 4). Les condensateurs fournissant de l'énergie réactive au réseau (tableau 1), il est alors possible de compenser la puissance réactive consommée par l'installation (3).

Dans cette étude, nous proposons de ramener le facteur de puissance du dispositif expérimental utilisé à une valeur égale à 0,93. Nous allons donc utiliser une batterie de condensateurs connectée à l'entrée du circuit via l'interrupteur K de sorte à compenser une partie de la puissance réactive consommée par la charge triphasée (inductance). Le diagramme des puissances peut alors se mettre sous la forme suivante :

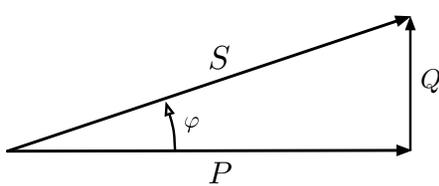


Figure 8 : Diagramme des puissances avant compensation.

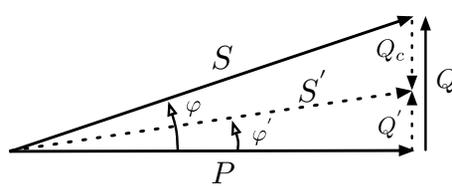


Figure 9 : Diagramme des puissances après compensation.