

PHYSIQUE APPLIQUÉE

Durée : 4 heures Coefficient 3

L'épreuve comporte trois parties totalement indépendantes.

L'objet du problème est l'étude des perturbations apportées par différentes charges sur un réseau électrique et de leurs corrections.

Le réseau fournit un système triphasé équilibré, de tensions sinusoïdales. Pour les deux premières parties, les courants prélevés au réseau sont sinusoïdaux, pour la troisième partie, les courants prélevés au réseau sont déformés et riches en harmoniques.

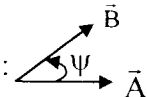
Notations employées :

. a : valeur instantanée de la grandeur $a(t)$.

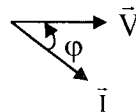
. A : valeur efficace de a .

. \underline{A} : grandeur complexe associée à a ; \vec{A} : vecteur de Fresnel associé à a .

. ψ : phase à l'origine d'une grandeur b par rapport à une grandeur a : $\psi = (\vec{A}, \vec{B})$:



. φ : déphasage de i par rapport à v : $\varphi = (\vec{I}, \vec{V})$:

**PREMIERE PARTIE A****Equilibrage d'une charge monophasée utilisée sur un réseau triphasé**

Pour les fours électriques de forte puissance, les éléments chauffants, résistances ou inductances, sont des dipôles monophasés, et non des ensembles de trois éléments identiques, qui réaliseraient alors des charges triphasées équilibrées.

Pour le réseau qui alimente le four, une charge monophasée constitue une charge triphasée déséquilibrée. L'objet de l'étude est la transformation, par compensation, d'une charge monophasée en une charge triphasée équilibrée.

La charge est alimentée par un réseau triphasé équilibré direct, parfaitement sinusoïdal, (noté R, S, T, N) ; le neutre N n'est pas relié. Quand une phase à l'origine est demandée sans précision de la référence, elle devra toujours être donnée par rapport à la tension composée \underline{U}_{RS} .

A-1 - ETUDE DES PERTURBATIONS

Four à résistance sans circuit d'équilibrage

Une résistance de chauffage permettant d'obtenir une puissance $P = 104 \text{ kW}$ est branchée entre les phases R et S (figure 1), d'un réseau triphasé 400 V, 50 Hz.

Quel est le déphasage φ du courant j_{RS} dans la résistance R par rapport à la tension u_{RS} ? Calculer les intensités efficaces et les phases à l'origine des trois courants en ligne i_{R1} , i_{S1} , i_{T1} , et placer ces courants sur le diagramme de Fresnel correspondant du document-réponse n° 1 a). On notera ψ_{R1} la phase de i_{R1} et ψ_{S1} celle de i_{S1} .

A-2 - CORRECTION DES PERTURBATIONS

Four à résistance avec circuit d'équilibrage

On utilise le circuit d'équilibrage de la figure 2 : une inductance L entre les phases R et T et une capacité C entre les phases S et T. Dans les questions A-2.1 et A-2.2 seuls ces éléments sont branchés sur le réseau.

Les valeurs de C et de L sont choisies de manière à ce que les puissances réactives mises en jeu dans ces deux dipôles soient égales entre elles en valeur absolue : $Q = 60 \text{ kvar}$.

A-2.1 - Déterminer les valeurs de $C\omega$ et de $L\omega$.

A-2.2 - Calculer l'intensité du courant i_{S2} et son biphasage φ_{S2} par rapport à u_{ST} . Calculer l'intensité efficace du courant i_{R2} et son déphasage par rapport à u_{RT} , puis sa phase ψ_{R2} par rapport à u_{TR} . Placer ces courants sur le diagramme de Fresnel du document-réponse n°1 b). En déduire l'intensité du courant i_{T2} et sa phase par rapport à u_{RS} .

A-2.3 - On ajoute ce circuit de compensation à la résistance de la première question (figure 3). Déterminer les intensités efficaces et les phases des trois courants de ligne : i_{R3} , i_{S3} , i_{T3} . Placer ces courants sur le diagramme de Fresnel du document-réponse n°1 c). Calculer la puissance active P et la puissance réactive Q fournies par le réseau R, S, T.

DEUXIEME PARTIE B

Compensation de puissance réactive à l'aide d'une machine synchrone

Pour fonctionner, de nombreuses charges nécessitent que le courant qui les traverse soit en retard sur la tension à leurs bornes, on dit alors qu'elles consomment de la puissance réactive. L'étude suivante porte sur un moteur synchrone, utilisé pour compenser l'énergie réactive consommée par l'éclairage d'un immeuble de bureaux.

B-1 - ETUDE DES PERTURBATIONS

Dans une entreprise, les bureaux sont situés dans un bâtiment, qui se trouve à 850 m du local technique contenant le transformateur d'alimentation générale. La liaison s'effectue en 230 V/400 V triphasé, par l'intermédiaire de 3 câbles de 35 mm² de section pour les phases et de 10 mm² de section pour le neutre. L'éclairage est réalisé par des lampes fluorescentes qui correspondent en régime permanent à une charge triphasée équilibrée de 50 kW avec un facteur de puissance $k = 0,76$ inductif. On rappelle que les courants seront considérés comme sinusoïdaux.

Etude des pertes en ligne

B-1.1 - Intensités

On suppose que la chute de tension dans les câbles a été prise en compte et que la tension composée pour le bâtiment de bureaux est bien de 400 V.

- ◆ Déterminer l'intensité efficace I dans chaque conducteur de phase.
- ◆ Quelle est l'intensité efficace du courant I_N dans le conducteur de neutre ?

B-1.2 - Résistance des câbles

Les câbles sont des conducteurs cylindriques en aluminium, de résistivité en conditions normales de fonctionnement : $\rho = 2,7 \times 10^{-8} \Omega.m$. Calculer la résistance totale de chacun des câbles.

Par la suite on prendra les valeurs suivantes, qui prennent en compte les résistances des connexions : phase : 1,0 Ω , neutre : 2,5 Ω .

B-1.3 - Pertes par effet Joule

Déterminer les pertes totales pour l'ensemble des câbles qui alimentent le bâtiment pour cette valeur du facteur de puissance.

B-2 - CORRECTION DES PERTURBATIONS

Pour améliorer le facteur de puissance du bâtiment on décide d'utiliser un moteur synchrone placé dans le bâtiment. Ce moteur fonctionnera en compensateur synchrone automatique, de manière à ce qu'à chaque instant, le facteur de puissance du bâtiment soit égal à 1.

Les caractéristiques électriques du moteur sont les suivantes : 4 pôles, couplage étoilé pour un fonctionnement sur le réseau triphasé 230 V/400 V, $P_{\text{nominale}} = 50 \text{ kW}$. Pour l'étude il sera modélisé suivant la méthode de la réactance synchrone (modèle linéaire dit de "Behn-Eschenburg"), conformément à la figure 4 correspondant à une phase de la machine dont les enroulements sont supposés couplés en étoile ; dans cette hypothèse on peut écrire $E_v = \beta I_e$ avec $\beta = 0,83 \times 10^3 \text{ V.A}^{-1}$.

B-2.1 - Paramètres du modèle

Pour déterminer les paramètres du modèle de la machine synchrone, on a réalisé les essais suivants en fonctionnement alternateur.

B-2.1.a - Caractéristique à vide

On a relevé la valeur efficace de la tension à vide E_v entre phase et neutre en fonction du courant dans le circuit d'excitation I_e .

$I_e(\text{A})$	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
$E_v(\text{V})$	0	41,5	83	124	166	207

A partir de ce tableau de mesures justifier la valeur du coefficient $\beta = 0,83 \times 10^3 \text{ V.A}^{-1}$.

B-2.1.b - Essais en court-circuit

On effectue un court-circuit symétrique sur les trois phases, on obtient les deux essais suivants :

$$I_e = 0 \text{ A}, I_{cc} = 0 \text{ A}, \quad I_e = 0,38 \text{ A}, I_{cc} = 70 \text{ A}.$$

Par ailleurs, une mesure de la résistance entre phase et neutre a donné $R = 0,1 \Omega$.

A partir de ces résultats, justifier la valeur de $X_s = 4,5 \Omega$.

Pour la suite, on négligera la résistance R devant la réactance synchrone X_s , ainsi que les pertes mécaniques et les pertes dans le fer.

B-2.2 - Compensateur synchrone

La machine fonctionne en compensateur synchrone : elle ne fournit aucune puissance mécanique mais elle fonctionne à vide en absorbant un courant en avance de $\frac{\pi}{2}$ rad sur la tension simple correspondante. Elle fournit donc une puissance réactive qui compense celle consommée par les lampes.

B-2.2.a - Déterminer à l'aide des hypothèses du **B-1** la puissance réactive totale consommée par les lampes. En déduire la valeur efficace de l'intensité du courant qui doit circuler dans la machine pour fournir cette même puissance réactive.

B-2.2.b - Donner la relation entre \underline{V} , \underline{E}_v et \underline{I} , puis représenter ces grandeurs sur un diagramme de Fresnel.

B-2.2.c - Déterminer la valeur du courant d'excitation correspondant à ce fonctionnement.

B-2.3 Amélioration du facteur de puissance à l'aide de la machine synchrone

B-2.3.a - La tension composée d'alimentation à 400 V est maintenue. La machine fonctionnant en compensateur synchrone, en parallèle avec la charge (l'ensemble du bâtiment) elle fournit, comme précédemment, une puissance réactive égale à celle qui est consommée par les lampes. Déterminer la nouvelle valeur du courant dans les câbles de phase.

B-2.3.b - Déterminer la nouvelle valeur des pertes en ligne.

B-2.3.c - Proposer une ou plusieurs solutions pour diminuer encore ces pertes en ligne.

TROISIEME PARTIE C

Alimentation continue en monophasé.

De nombreux appareils (alimentation à découpage, variateur de fréquence,...) reliés au réseau alternatif transforment dans un premier temps, la tension alternative du réseau en une tension continue. Pour le réseau, ils sont tous équivalents à un redresseur à diodes débitant sur un condensateur de filtrage. On ne s'intéresse dans ce problème qu'à un appareil relié à une source monophasée (montage de la figure 5).

La tension d'entrée v_L est celle du réseau électrique que l'on suppose toujours sinusoïdale quelle que soit l'allure du courant i_L ; $v_L = V_m \sin \omega t$. La charge appelle un courant continu que l'on supposera d'intensité constante I_c .

C-1 - ETUDE DU COURANT D'ENTRÉE

C-1.1 - Allure des signaux

Sur le document-réponse n° 2 on a représenté :

- la tension redressée v_2 à la sortie du pont de diodes en l'absence de condensateur,
- l'allure du courant $i_L(t)$ en présence du condensateur.

Compléter le document en représentant l'allure de v_2 en tenant compte de la présence du condensateur, noté v_{red} .

C-1.2 - Etude du courant

Pour simplifier on considère que le courant de ligne a l'allure générale de la figure 6.

$$i_L(\omega t) \text{ peut se mettre sous la forme : } i_L(\omega t) = \sum_{k=0}^{k=\infty} \frac{4 I_m \cos((2k+1)\alpha)}{(2k+1)\pi} \sin((2k+1)\omega t).$$

Dans cette expression $p = 2k + 1$ est le rang de l'harmonique considéré.

Donner l'expression de l'amplitude du fondamental i_{L1} en fonction de α . Quelle est la propriété du modèle choisi pour $i_L(t)$ qui entraîne l'absence d'harmoniques pairs (aucune démonstration n'est demandée) ?

C-1.3 - Influence du condensateur de filtrage

On considère que la charge du pont est invariable.

Lorsque la capacité du condensateur de filtrage C augmente, comment évoluent l'intervalle de conduction (α , $\pi - \alpha$) et l'amplitude I_m de pointe du courant ?

C-2 - FACTEUR DE PUISSANCE

C-2.1 - Etude du fondamental

Sur le document-réponse n°2, donner l'allure du fondamental du courant de ligne i_{L1} .

C-2.2 - Puissance réactive

A partir du tracé du fondamental du courant, donner en la justifiant la puissance réactive mise en jeu dans ce dispositif.

C-3 - VALEUR EFFICACE DU COURANT DE LIGNE

A partir de la figure 6 montrer que la valeur efficace I_L du courant de ligne i_L peut s'écrire :

$$I_L = I_m \sqrt{\left(1 - \frac{2\alpha}{\pi}\right)}$$

C-4 - PUISSANCE ACTIVE

La puissance active s'écrit $P = V_L I_{L1} \cos \varphi_1$ où φ_1 est le déphasage du fondamental du courant par rapport à la tension correspondante.

A partir des résultats précédents, établir l'expression du facteur de puissance k en fonction de α . On précise que α n'est pas un angle de retard à l'amorçage, mais l'angle de début de conduction des diodes sur charge capacitive (voir figure 6).

Pour quelle raison le facteur de puissance n'est-il pas égal à 1 ?

C-5 - APPLICATIONS NUMÉRIQUES

On prend $\alpha = 70^\circ$, $I_m = 1,0$ A, $V_L = 230$ V. Calculer la valeur efficace I_{L1} du fondamental du courant, la valeur efficace I_L du courant de ligne, la puissance active fournie à la charge, la valeur du facteur de puissance k . Comment évolue le facteur de puissance quand la capacité du condensateur augmente ?

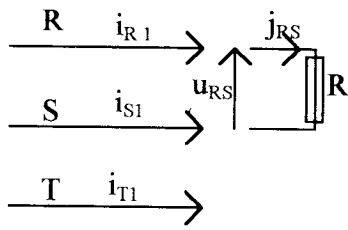


FIGURE 1

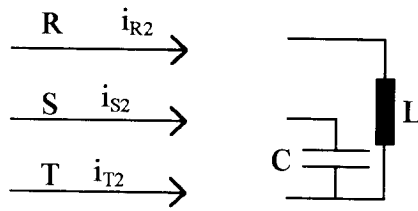


FIGURE 2

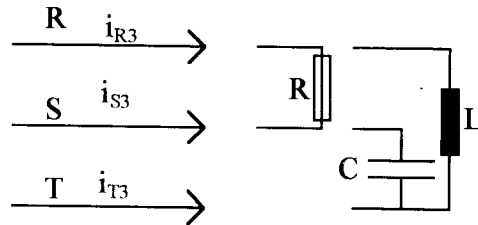


FIGURE 3

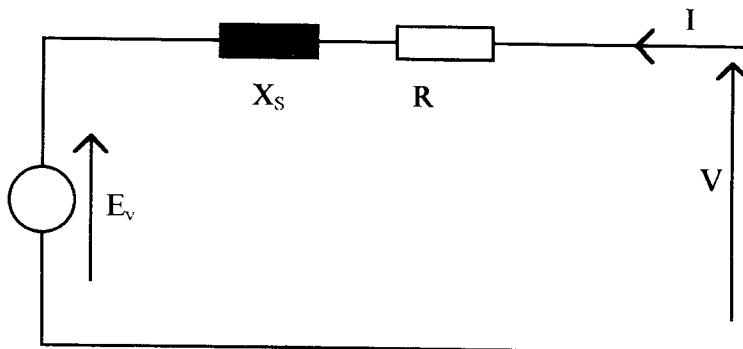


FIGURE 4

$$E_v = \beta I_c \quad \beta = 830 \text{ V}\cdot\text{A}^{-1}$$

$$X_S = 4,5 \ \Omega$$

$$R = 0,1 \ \Omega$$

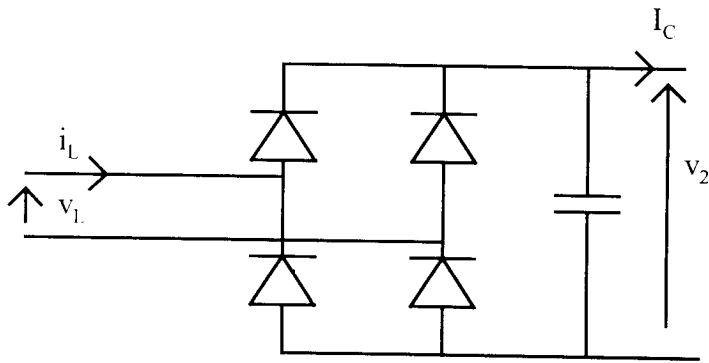


FIGURE 5

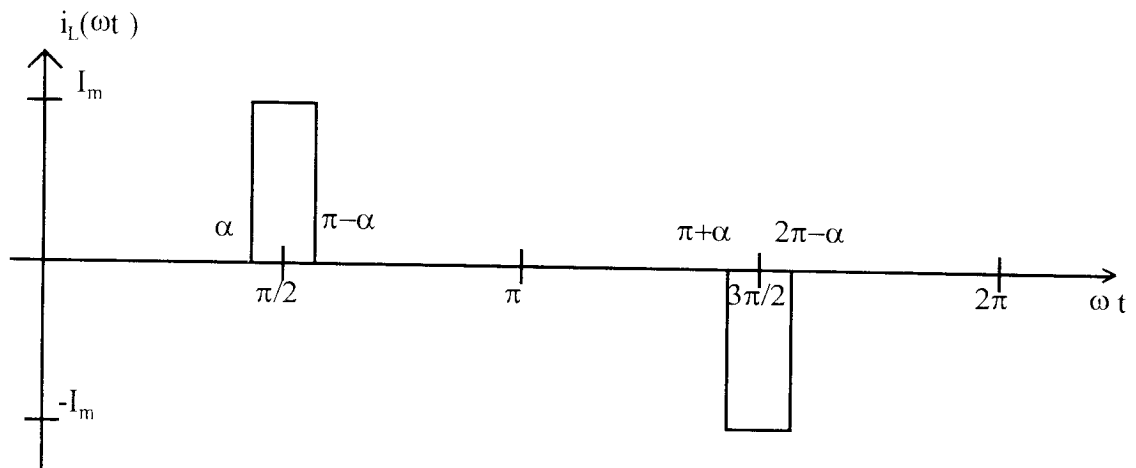
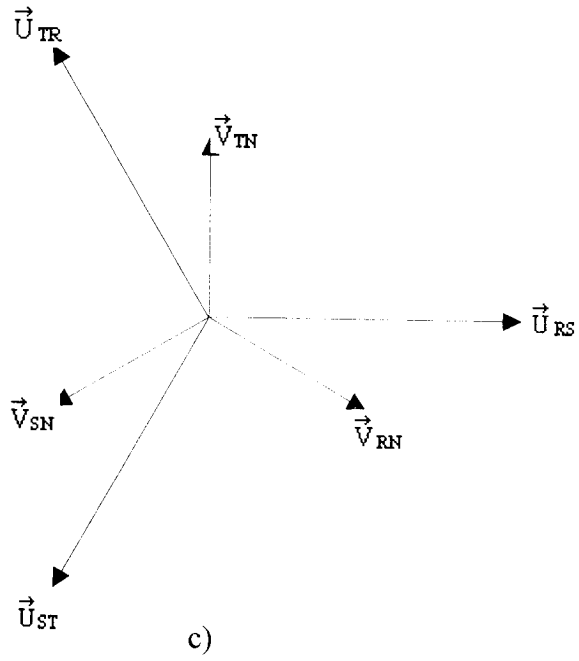
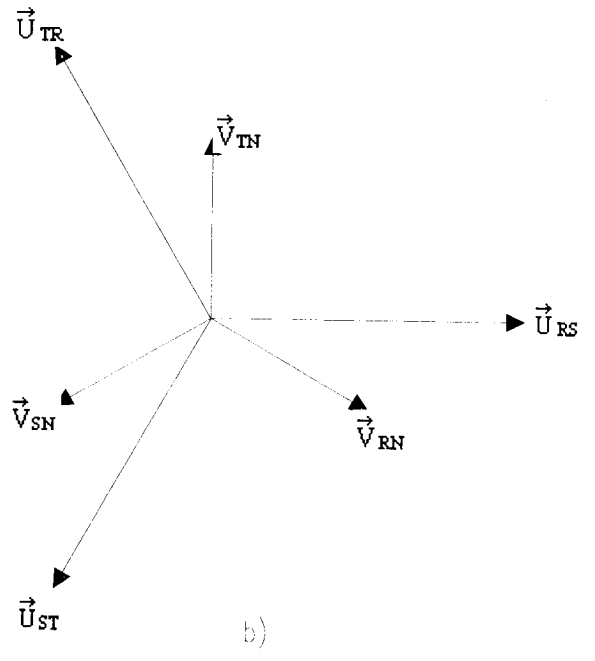
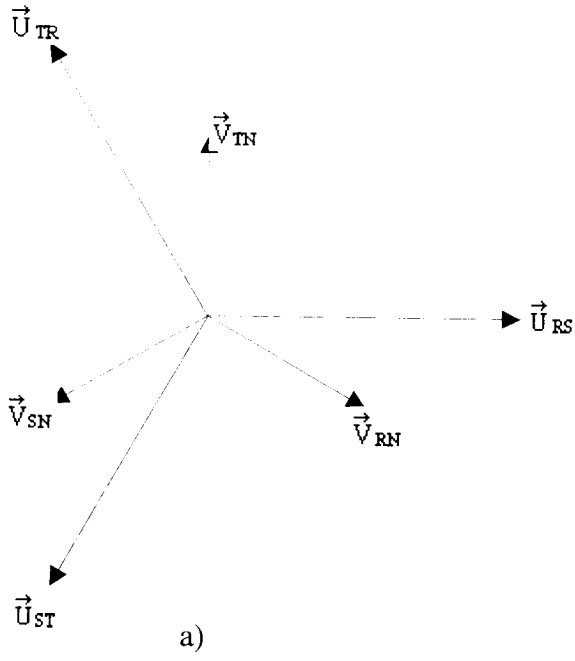


FIGURE 6



Echelle :
1cm : 100A
1cm : 100V

