

NOM : ..... Signature :

Prénom : .....

**Examen Médian**

Lundi 7 mai 2018

***Aucun document n'est autorisé – Calculatrice autorisée – Durée : 2h******Le sujet doit être rendu***

Ce sujet comporte 5 pages.

Lisez attentivement et entièrement l'énoncé des exercices proposés.

Respectez les instructions de l'énoncé.

Écrivez votre nom sur vos copies et numérotez-les.

Tout prêt de matériel et toute collaboration sont strictement interdits.

**Questions de cours (5 pts)**

- 1) Donner une définition simple de la qualité de l'énergie électrique et citer brièvement les différentes perturbations pouvant apparaître sur un réseau électrique.
- 2) Citer les deux principales normes définissant les caractéristiques au point de livraison du client pour un réseau public basse tension concernant les niveaux de tensions harmoniques.
- 3) Citer quelques exemples de charges polluantes que l'on peut retrouver sur un réseau électrique basse tension résidentiel ou industriel.
- 4) Citer au moins trois effets néfastes de la présence d'harmoniques de courant et tension sur un réseau électrique basse tension.
- 5) Citer au moins trois solutions permettant de réduire le taux de distorsion harmonique en tension sur un réseau électrique basse tension composé de charges propres (linéaires) et polluantes (non-linéaires).

**Exercice 1 : Contrôle de connaissances (3 pts)**

Cochez la(les) bonne(s) réponse(s)

- 1) Le courant efficace est défini comme suit

$I_{h1}$

$I_{h3}$

$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{hn}^2}$

$\sqrt{I_{h1}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{hn}^2}$

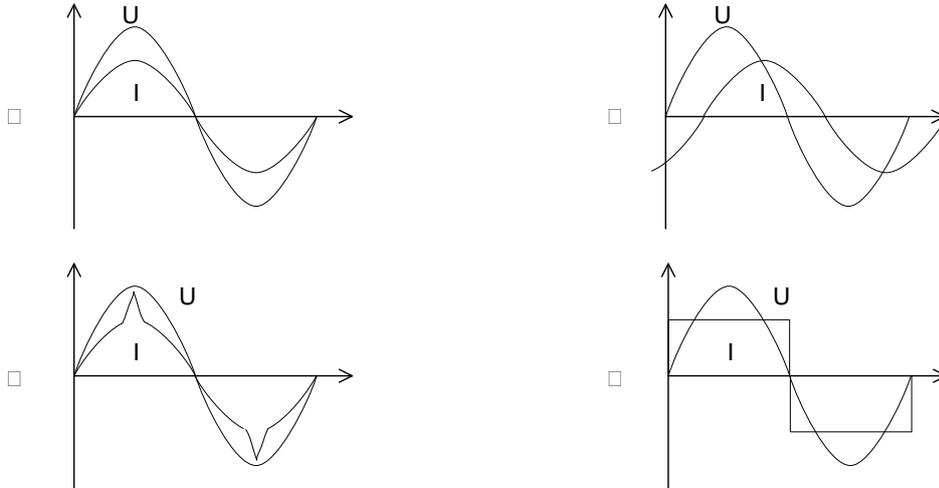
- 2) Sur une charge non-linéaire

$f_p = \cos \varphi_1$

$f_p \leq \cos \varphi_1$

$f_p \geq \cos \varphi_1$

3) Allure de courant d'une charge non-linéaire



4) Le TDHI est défini comme suit

$\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{hn}^2}}{I}$ 
  $\frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{hn}^2}}{I}$ 
  $\frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{hn}^2}}{I_1}$ 
  $\frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{hn}^2}}{I_1}$

5) La résonance série de l'impédance d'un réseau électrique sans présence de puissance active mais comportant une batterie de condensateurs et des charges linéaire et non-linéaire est définie lorsque

- Z est minimum
  Z → ∞
  Z → 0

6) La résonance parallèle de l'impédance d'un réseau électrique comportant une batterie de condensateurs et des charges linéaire et non-linéaire est définie lorsque

- Z est maximum
  Z → ∞
  Z → R

**Exercice 2 : Etude de cas (12 pts)**

On considère l'installation triphasée équilibrée représentée à la figure 1 de la page 3. La puissance de court-circuit au point de livraison haute tension vaut  $S_{cc} = 100$  MVA.

La charge non-linéaire est alimentée par un transformateur ayant une tension composée primaire nominale  $U_{1N}$  de 20 kV et une tension composée secondaire à vide  $U_{20}$  de 400 V sous 50 Hz de puissance apparente 800 kVA ayant une tension de court-circuit  $u_{cc} = 6\%$ .

La charge non-linéaire triphasée consomme une puissance active  $P = 500$  kW et une puissance réactive  $Q = 250$  kVAr. Le fondamental du courant absorbé par la charge vaut 810 A, l'harmonique 5 vaut 162 A, l'harmonique 7 vaut 115 A et l'harmonique 11 vaut 73 A. Les autres harmoniques de courant sont négligés.

Dans un premier temps, une batterie de condensateurs sera connectée en parallèle afin de compenser totalement la puissance réactive de la charge non-linéaire. Cependant, cette solution engendrera des perturbations harmoniques dont vous quantifierez les niveaux de pollution. Vous devrez donc choisir un système de compensation adapté selon les recommandations des fabricants (rapport  $Gh/S_N$  avec  $Gh$  : puissance apparente de la charge polluante et  $S_N$  : puissance

apparente nominale du transformateur). Généralement, pour un rapport compris entre 25% et 60%, une solution de type SAH sera utilisée et pour un rapport strictement supérieur à 60%, l'utilisation de filtre(s) (passif et/ou actif) est préférable.

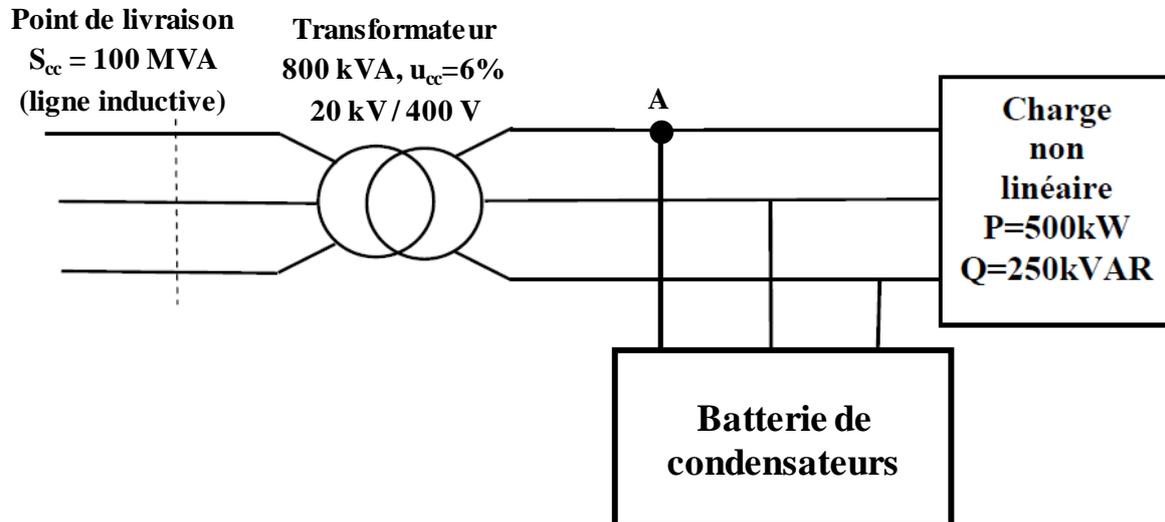


Figure 1

### **Partie 1 : Etude du réseau amont, du transformateur, de la charge non-linéaire et de la batterie de condensateurs**

On considère que la tension efficace aux bornes de la charge non-linéaire est égale à 230 V.

- 1) Calculer l'inductance du réseau amont  $l_a$  ramenée au secondaire du transformateur.
- 2) Calculer l'inductance de fuite  $l_t$  ramenée au secondaire du transformateur. En déduire l'inductance totale  $l$  (réseau amont + transformateur) ramenée au secondaire du transformateur.
- 3) Calculer le taux de distorsion harmonique en courant de la charge non-linéaire.
- 4) Calculer les facteurs de puissance et de déplacement de la charge non-linéaire. En déduire la valeur de la puissance déformante.
- 5) Calculer la valeur de la capacité  $C$  par phase de la batterie de condensateurs (couplée en étoile) afin de compenser la totalité de la puissance réactive de la charge non-linéaire.

### **Partie 2 : Etude en régime harmonique – mise en avant de la problématique**

On considère les éléments suivants :  $l = 43,29\mu H$  ;  $C = 5,01mF$

- 6) Donner le modèle équivalent monophasé de l'installation pour l'harmonique de rang  $n$ .
- 7) Démontrer que l'impédance de l'installation pour l'harmonique de rang  $n$  s'écrit comme suit :

$$\underline{Z}_n = j \frac{l \cdot n \cdot \omega}{1 - l \cdot C \cdot (n \cdot \omega)^2}$$

- 8) En déduire le rang  $n_{rp}$  de la résonance parallèle de l'impédance harmonique de l'installation.  
 9) En vous basant sur la formule approchée de la résonance parallèle donnée par les fabricants ( $n_{rp} = \sqrt{\frac{S_{cca}}{Q_C}}$  avec  $S_{cca}$  la puissance de court-circuit au secondaire du transformateur), vérifier la valeur calculée à la question précédente.

- 10) Calculez le taux de distorsion harmonique de la tension au point A ainsi que le courant efficace circulant dans la batterie de condensateurs. Concluez par rapport aux recommandations de la norme, sur l'impact aux niveaux des protections de la batterie de condensateurs et sur le courant efficace vu par le transformateur.

On donne les éléments suivants :  $Z_1 = 0,014\Omega$  ;  $Z_5 = 0,146\Omega$  ;  $Z_7 = 1,948\Omega$  et  $Z_{11} = 0,094\Omega$

### **Partie 3 : Etude en régime harmonique – mise en place d'une solution de compensation**

- 11) En vous basant sur le rapport Gh/S<sub>N</sub>, déterminer la solution la plus appropriée pour l'installation. Pour information, en raison du coût important, le filtre actif n'a pas été retenu par l'industriel.  
 12) L'industriel souhaite mettre en place un filtre passif ( $l_5, C_5$ ) accordé sur le rang harmonique 5. Donner le nouveau modèle équivalent monophasé de l'installation pour l'harmonique de rang  $n$ .  
 13) Calculer les éléments ( $l_5, C_5$ ) du filtre passif tel que :
- réseau électrique basse tension ( $U_1 = 400 V, f = 50 Hz$ ),
  - rang d'accord du filtre  $n_{rs} : 5$ ,
  - compensation de la totalité de la puissance réactive de la charge non-linéaire.

On rappelle les éléments suivants :

$$n_{rs} = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{l_5 \cdot C_5}}$$

$$Q_f = 3 \cdot \frac{n_{rs}^2 - 1}{n_{rs}^2} \cdot C_5 \cdot V_1^2 \cdot \omega$$

- 14) Démontrer que la nouvelle impédance de l'installation pour l'harmonique de rang  $n$  s'écrit comme suit :

$$\underline{Z}'_n = j \frac{l \cdot n \cdot \omega \cdot (1 - l_5 \cdot C_5 \cdot n^2 \cdot \omega^2)}{1 - (l + l_5) \cdot C_5 \cdot n^2 \cdot \omega^2}$$

En déduire les expressions puis les valeurs des rangs  $n_{rs}$  et  $n_{rp}$  des résonances série et parallèle de l'impédance harmonique de l'installation. Analyser.

- 15) Calculez le nouveau taux de distorsion harmonique de la tension au point A ainsi que le courant efficace circulant dans la batterie de condensateurs. Concluez par rapport aux recommandations de la norme, sur l'impact aux niveaux des protections de la batterie de condensateurs, sur la puissance apparente du filtre passif et sur le courant efficace vu par le transformateur.

On donne les éléments suivants :  $Z'_1 = 0,014\Omega$  ;  $Z'_7 = 0,046\Omega$  et  $Z'_{11} = 0,091\Omega$

**BONUS (2pts)**

Au départ, l'industriel désirait connecter un filtre passif accordé sur le rang harmonique le plus proche de la résonance parallèle de l'installation déterminé à la partie 2. Or, il est apparu que le taux de distorsion harmonique de la tension au point A était encore très élevé par rapport à la recommandation de la norme.

A partir de la partie 3 de l'exercice 2, démontrer pourquoi il n'est pas recommandé de mettre un filtre passif accordé sur le rang harmonique 7.