

**RÉGULATION D'UN TURBO-ALTERNATEUR
dans un atelier de fabrication d'ammoniac**

La fabrication du gaz ammoniac est réalisée industriellement à partir d'hydrogène (extrait du gaz naturel) et d'azote. Cette réaction réversible est réalisée à haute pression et sous une température de 380 °C. A partir du combustible gaz naturel, une chaudière produit un réseau vapeur haute pression qui sert à la production d'électricité grâce à un alternateur et à la fabrication de l'ammoniac. L'électricité ainsi produite est revendue à E.D.F dans un fonctionnement normal et assure la continuité de service de l'atelier ammoniac en cas de panne de l'alimentation générale (mode îlotage).

En mode normal, l'alternateur sert avant tout à réguler le réseau vapeur en fonction de la production d'ammoniac, augmentant ainsi le rendement de l'installation.

Cette régulation est réalisée par un système numérique de contrôle et de commande.

Les 4 parties A, B, C, D sont totalement indépendantes.

Elles étudient l'alternateur, les dispositifs de sécurité électrique et certains éléments intervenant dans la chaîne de régulation de pression de la vapeur.

Aucune connaissance sur la machine synchrone utilisée en alternateur n'est demandée pour répondre aux questions.

Partie A : Étude de l'alternateur couplé sur le réseau E.D.F.

Le schéma fonctionnel général est donné en *Annexe 1, Figure 1, page 4*.

Caractéristiques de l'alternateur : $P_n = 6,24$ MW, $U_n = 3580 / 6200$ V, $\eta = 97$ %, $p = 2$ (nombre de paires de pôles), $f = 50$ Hz.

Pour pouvoir réaliser le couplage et commander la fermeture de l'interrupteur triphasé K, il est nécessaire que les deux tensions $u_1(t)$ et $u_2(t)$ soient de même amplitude et de même fréquence.

A la lecture du schéma et des grandeurs numériques fournies, répondre aux questions suivantes :

- A.1** Quelle doit-être la vitesse de rotation en tours par minute du rotor de l'alternateur ? Justifier le résultat en écrivant la formule utilisée, en précisant les grandeurs qu'elle contient ainsi que leurs unités.
- A.2** Quelle devra être la tension efficace entre phases délivrée par l'alternateur pour pouvoir commander la fermeture des interrupteurs K. Quel couplage des enroulements du stator de l'alternateur devra-t-on adopter ?
- A.3** Le réseau EDF et le transformateur d'entrée de l'atelier se comportent comme une charge inductive de $\cos \varphi = 0,90$. Quelle sera la valeur efficace I du courant de ligne délivré par l'alternateur en charge nominale.
- A.4** En fonctionnement nominal, quels seront la puissance mécanique et le couple moteur fournis par la turbine à l'alternateur.

Partie B : Étude de la mise en forme et de la transmission du signal de mesure

La mesure du débit du réseau vapeur se fait par la mesure d'une pression différentielle, Δp . Elle est effectuée grâce à un capteur capacitif. Le signal est ensuite traité selon le schéma fonctionnel donné en *Annexe 2, figure 1, page 5*.

L'oscillateur délivre une tension $e_a(t) = E_a \sin(\omega_a t)$. Sa modélisation complexe s'écrira $\underline{E}_a(j\omega_a)$.

Le schéma du pont contenant le capteur est donné *Annexe 2, figure 2, page 5*.

L'amplificateur linéaire intégré est supposé idéal. Il fonctionne en régime linéaire.

L'expression temporelle de la tension de sortie du multiplieur est :

$$v_c(t) = KV_m(t)e_a(t)$$

On donne $\sin^2(a) = \frac{1}{2}[1 - \cos(2a)]$.

B.1 Étude du pont

B.1.1 Écrire l'expression de $\underline{I}_1(j\omega_a)$ en fonction de $\underline{E}_a(j\omega_a)$, C_1 , ω_a .

B.1.2 Écrire l'expression $\underline{I}_2(j\omega_a)$ en fonction de $\underline{E}_a(j\omega_a)$, C_2 , ω_a .

B.1.3 En déduire l'expression de $\underline{I}_m(j\omega_a)$ en fonction de $\underline{E}_a(j\omega_a)$, C_1 , C_2 , ω_a .

B.1.4 Donner alors l'expression de $\underline{V}_m(j\omega_a)$. En déduire que $V_m(t) = E_a \frac{C_2 - C_1}{C} \sin(\omega_a t)$

B.2 Étude de la chaîne de détection

B.2.1 Donner l'expression de la tension $v_c(t)$.

B.2.2 Justifier la représentation du spectre d'amplitude de $v_c(t)$ donnée en *Annexe 2, Figure 3, page 5*.

B.2.3 Le filtre passe bas d'amplification égale à 1 dans la bande passante est supposé idéal et a pour pulsation de coupure ω_a . Montrer alors que $v_s(t) = V_s = \text{constante}$. Préciser son expression.

B.2.4 On donne $K = 10$, $C = 220 \text{ nF}$, $E_a = 2 \text{ V}$, $C_2 - C_1 = 0,224 \times 10^{-6} \times \Delta p$.

Δp est la pression différentielle mesurée exprimée en bar, $C_2 - C_1$ en farad.

Quelle est la pression différentielle Δp maximale mesurable si le signal de sortie V_s évolue entre 0 et 5 V ?

B.3 Étude de la transmission de la mesure

Le signal de mesure est transmis à l'aide d'une boucle de courant 4/20 mA. La pression différentielle Δp évolue entre 0 et 245 mbar. On rajoute à ce signal des données numériques selon le protocole HART. Les données numériques sont transmises sous forme d'octets en modulation FSK (fréquence 1 200 Hz pour un 0, fréquence 2 200 Hz pour un 1).

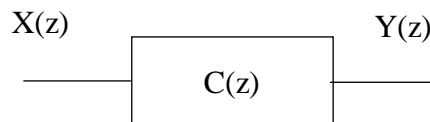
Au vu du relevé du signal fourni en *Annexe 2, figure 4, page 5*, on demande de répondre aux questions suivantes :

CAE3PA

- B.3.1** Quelle est la valeur de la pression différentielle transmise ?
- B.3.2** Quelle est la vitesse de transmission de la liaison numérique (300, 600, 1 200, 2 400, 3 600, 9 600 bauds) ?
- B.3.3** Quel est l'octet transmis lors de la trame observée sur le relevé si le bit de poids faible est transmis en premier ?

Partie C : Étude du régulateur numérique

Le régulateur numérique traite des informations échantillonnées / bloquées avec une période d'échantillonnage T_e . On appelle X_n la série d'échantillons arrivant sur l'entrée du régulateur. En sortie, il fournit une série d'échantillons Y_n , également échantillonnés / bloqués, qui commandent le processus.



$X(z)$ et $Y(z)$ sont les transformées en z des séries X_n et Y_n . $C(z)$ est la transmittance du régulateur numérique. On rappelle qu'alors les séries X_{n-1} et Y_{n-1} auront pour transformée en z respectivement $z^{-1} X(z)$ et $z^{-1} Y(z)$.

On donne $C(z) = K_p \left(1 + \frac{T_e}{K_i} \frac{z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right)$ avec $K_p = 1,8$ $K_i = 6 \times 10^{-3}$ $T_e = 1$ ms

C.1 Équation de récurrence

Montrer que l'équation de récurrence se met sous la forme :

$$Y_n = Y_{n-1} + 1,8 X_n - 1,5 X_{n-1}$$

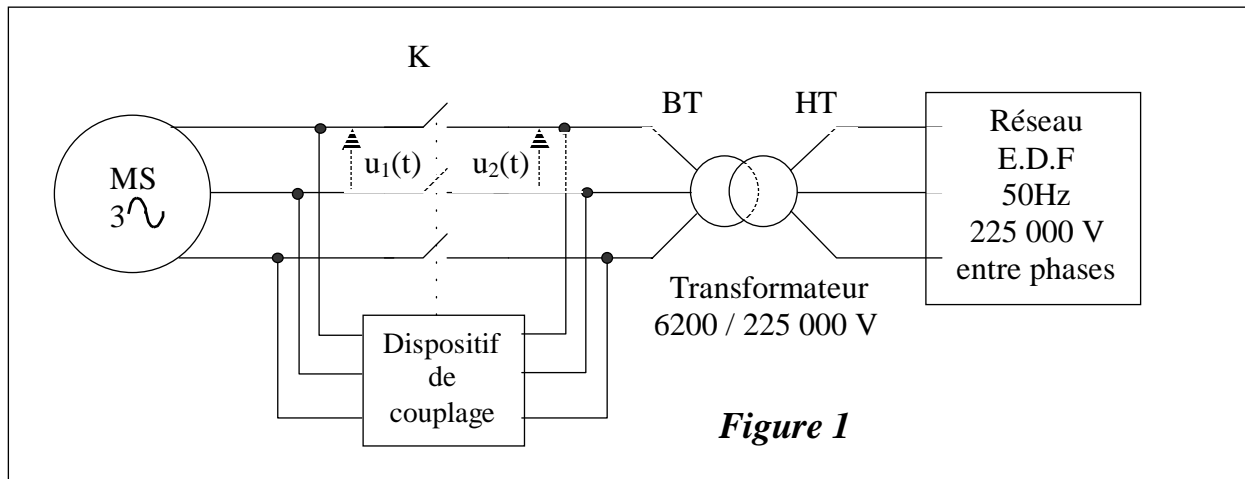
C.2 Étude de la réponse indicielle

Compléter le *tableau N°1 du document réponse*.

C.3 Type de régulateur

Représenter Y_n sur le *document réponse figure 2*, sachant que Y_n est échantillonné bloqué. De quel type de régulateur s'agit-il ? Justifier votre réponse.

ANNEXE 1



ANNEXE 2

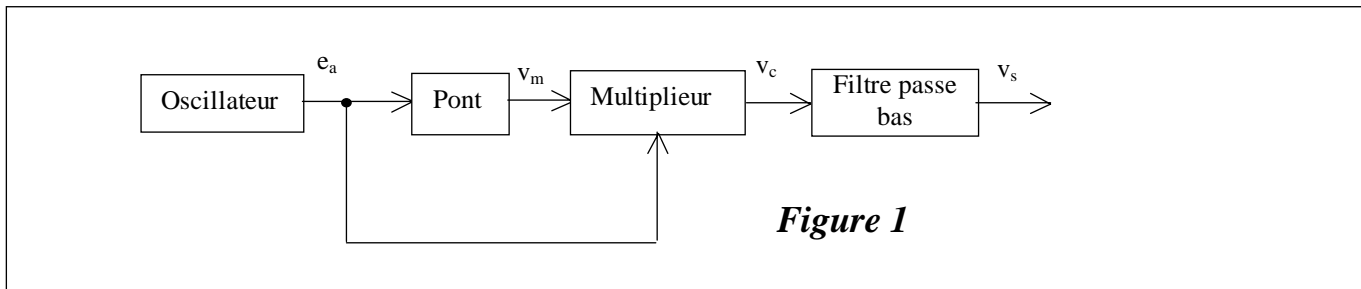


Figure 1

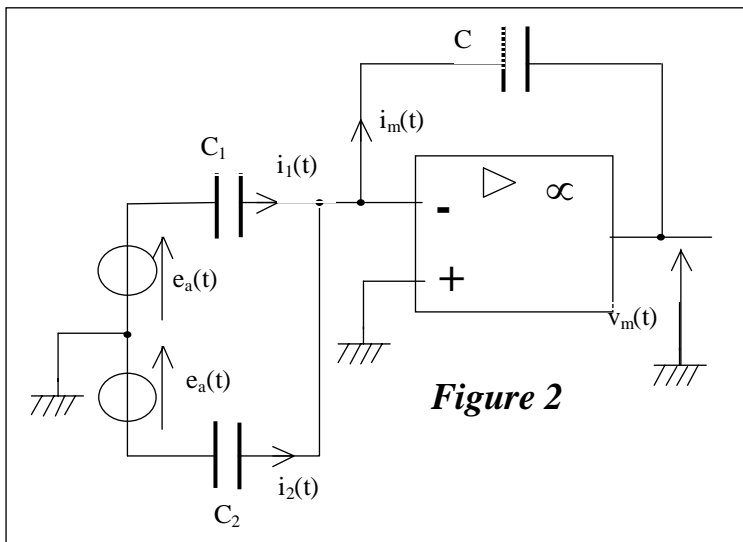


Figure 2

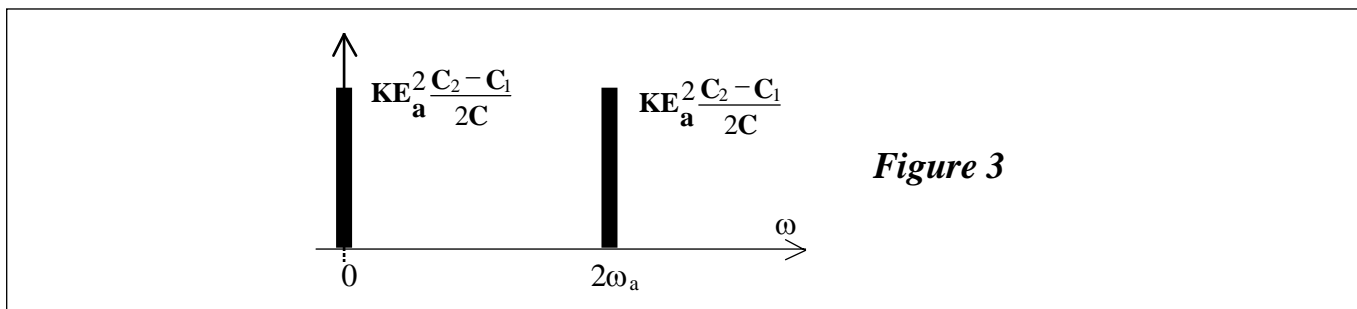


Figure 3

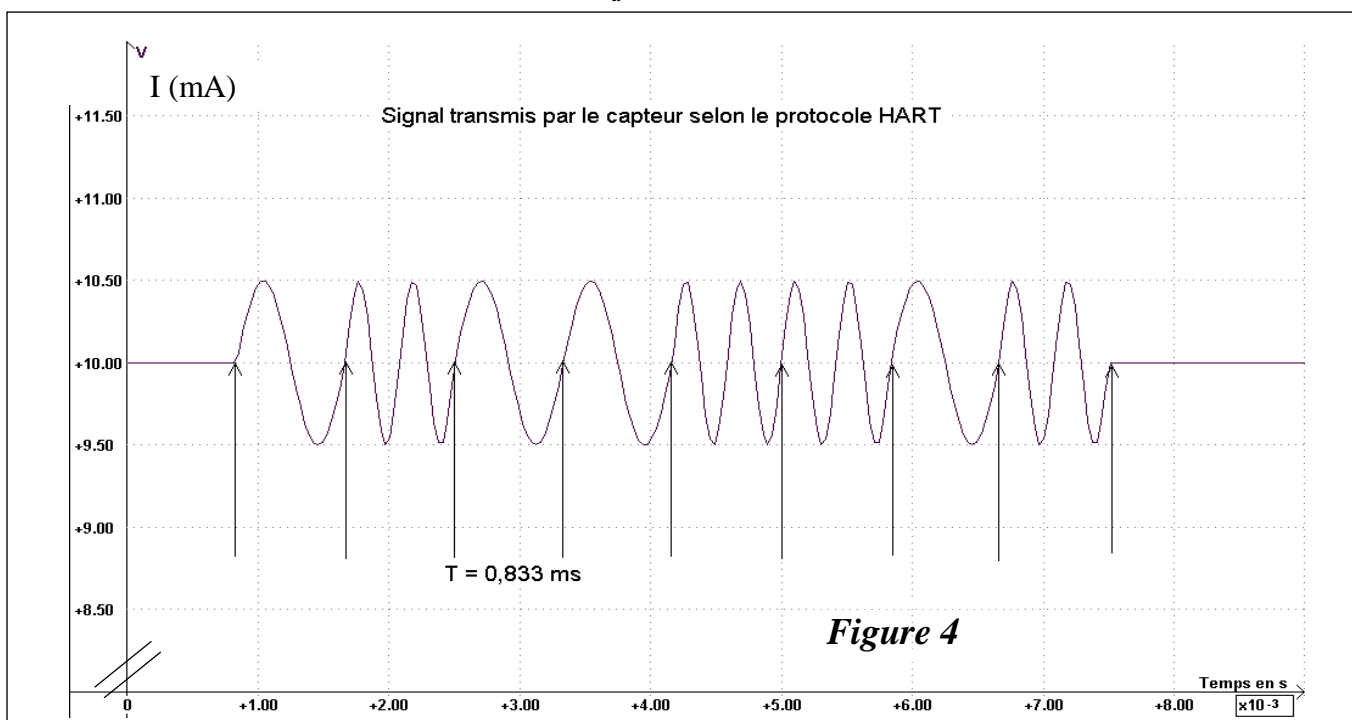


Figure 4

DOCUMENT RÉPONSE

nT_e	0	T_e	$2T_e$	$3T_e$	$4T_e$
X_n	0	1	1	1	1
X_{n-1}	0				
Y_{n-1}	0				
Y_n	0				

Tableau N°1

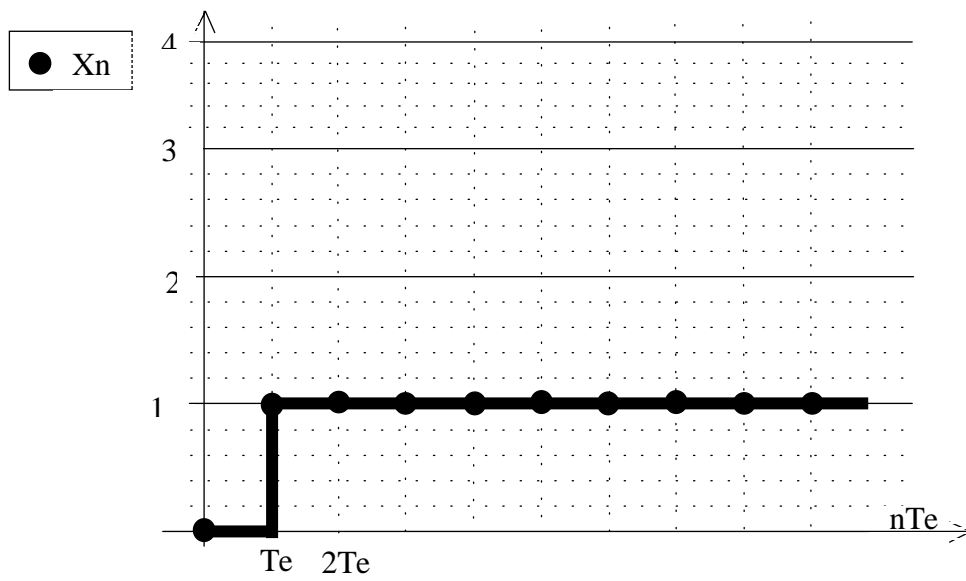


Figure 2

A RENDRE AVEC LA COPIE

DOCUMENT RÉPONSE

nT_e	0	T_e	$2T_e$	$3T_e$	$4T_e$
X_n	0	1	1	1	1
X_{n-1}	0				
Y_{n-1}	0				
Y_n	0				

Tableau N°1

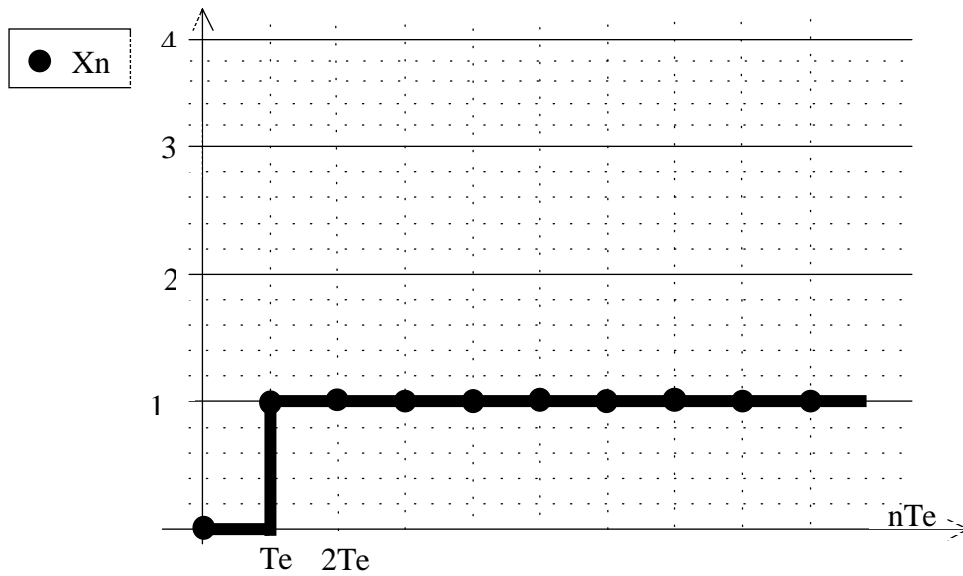


Figure 2