

Nom :

UNIVERSITE D- EL OUED

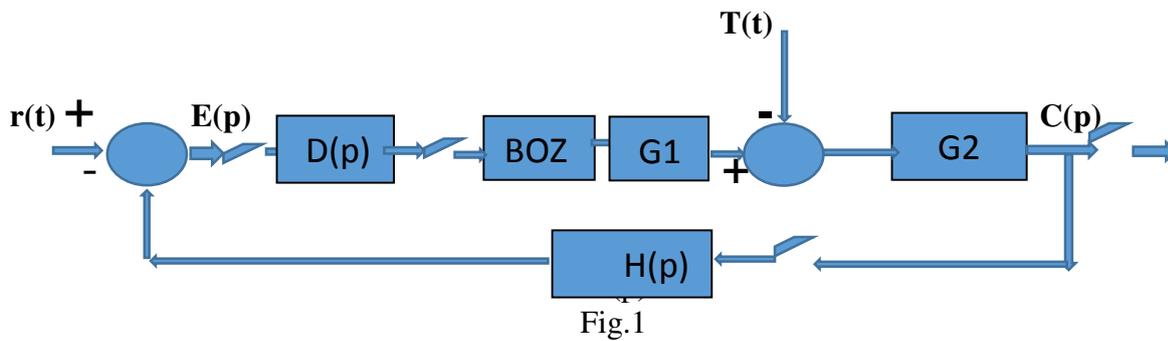
FACULTE DE SCIENCE ET TECHNOLOGIE

Durée=1H

DEPARTEMENT : Génie électrique

Filière : ELECTROTECHNIQUE

EXO A)(12pts). Soit le système asservi échantillonné donné par le schéma ci-dessous :



On choisit un pas d'échantillonnage $T_e=0.5s$.

(7pts) a- Déterminer les expressions de la réponse $C^*(p)$, $C(z)$ et de l'erreur $E(z)$ si on excite le système par le signal d'entrée $r(t)$ et le signal $T(t)$ donnés par : $r(t) = 10u(t)$ et $T(t) = 5u(t - 0.5)$ si on prend :

$$D(p) = 2e^{-0.5p} ; Z(p) = \frac{1-e^{-Tp}}{p}, \quad G1(p) = 5; \quad G2(p) = \frac{2}{(p+1)} \text{ et } H(p) = 3.$$

(3pts) b- Déterminer l'expression de $c^*(t)$ et déduire les valeurs de $c(k)$ pour $k=1, 2, 3$ et 4 par la méthode de division polynomiale.

(2pts) c- Déterminer l'erreur statique $e(\infty)$ du système.

Réponses :

Nom :

① Amplitude et module : Asservissement échantillonné
Master I (CE) 03/06/2021

Exo A: d) D'après le schéma fonctionnel on obtient :

$$C^*(z) = \frac{D^*(1-e^{-T}) \{ G_1 G_2 z^* R^* - (T G_2)^* \}}{1 + H^* (1-e^{-T}) \{ G_1 G_2 z^* \}} \quad (1) \quad \leftarrow (2 \text{pts})$$

$$E^*(z) = \frac{R^* - (T G_2)^* H^*}{1 + H^* (1-e^{-T}) \{ G_1 G_2 z^* \}} \quad (2) \quad \leftarrow (2 \text{pts})$$

Elgwe: $H^* = \frac{1}{1-e^{-T}}$; $T=3$; $H^* = 3$; $\mathcal{Z} \left\{ \frac{G_1 G_2 z^*}{p} \right\} = \frac{z(4e^{-T})}{(z-1)(z-e^{-T})}$ (3)

$D(z) = 2z^{-1}$; $\mathcal{Z} \{ T G_2 \} = \frac{10(1-e^{-T})}{(z-1)(z-e^{-T})}$ et $R(z) = 10 \frac{z}{z-1}$ $\leftarrow (1 \text{pt})$

Si on remplace (3) dans (1) et (2), on obtient :

$$C(z) = \frac{+76z}{z^3 - 1,6z^2 + 2,4z - 2,4} \quad \text{et} \quad \leftarrow (0,5 \text{pt})$$

$$E(z) = \frac{10z^2 - 6z - 12}{(z-1)(z^2 - 0,6z + 2,4)} \quad \leftarrow (0,5 \text{pt})$$

b) Déterminer $C^*(z)$ et $C(k)$ pour $k=1, 2, 3$ et $4 \dots$
par division polynomiale :

$$\begin{array}{r} z^3 - 1,6z^2 + 2,4z - 2,4 \\ \underline{+ 76z} \\ \hline \end{array} \quad \leftarrow (2 \text{pts})$$

Sans le résultat de division, on trouve :

$$C^*(z) = \sum_{k=1}^{\infty} C(k) \delta(t - kT) \quad (4)$$

$$= C(0) \delta(t) + C(1) \delta(t - T) + C(2) \delta(t - 2T) + \dots \quad (5)$$

Par comparaison (4) et (5) $\Rightarrow C(0) = 0$; $C(1) = -10$ $\leftarrow (1 \text{pt})$

$C(2) = 74$; $C(3) = 468$; \dots

on $C^*(z) = -10 \delta(t - T) + 74 \delta(t - 2T) + 468 \delta(t - 3T) + \dots$

d) L'erreur statique $e(k) = e(\infty)$ d'après le théorème de

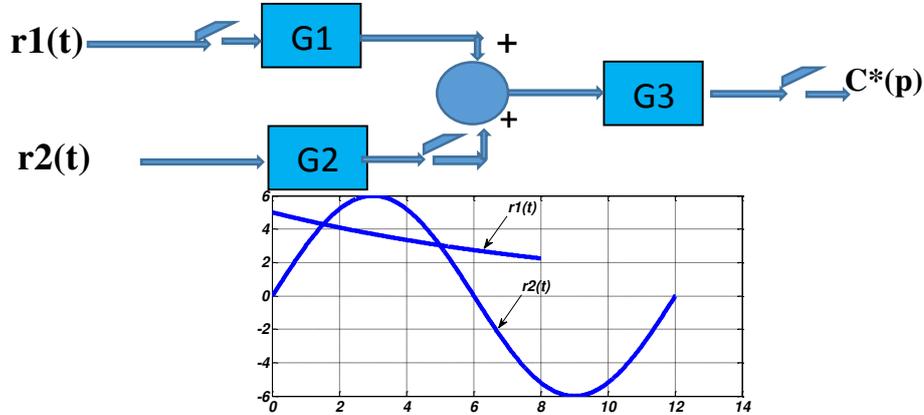
$$\lim_{k \rightarrow \infty} e(k) = e(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} E^*(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \left(\frac{10z^2 - 6z - 12}{z^2 - 0,6z + 2,4} \right) \times \frac{1}{(z-1)}$$

$$\frac{10 - 6 - 12}{-0,5} = -24,4 \quad \leftarrow (2 \text{pts})$$

Nom :

EXO B)(8pts). Soit le système échantillonné qui est présenté par le schéma ci-dessous ayant les fonctions de transferts suivantes et excité par les signaux $r_1(t)$ et $r_2(t)$ respectivement:

$$G_1 = \frac{1}{p+0.1} \text{ et } G_2 = e^{-4p} . G_3 = \frac{10}{p} \quad r_1(t) = 5\exp(-t) \text{ et } r_2(t) = A\sin(\omega t) .$$



Le pas d'échantillonnage $T_e=4s$.

Trouver les expressions de $C^*(p)$ et $C(z)$ en se basant sur les formes des entrées $r_1(t)$ et $r_2(t)$ et évaluer la valeur finale de $c(\infty)$.

Note : Les fonctions usuelles sont données par les tables suivantes

$f(t)$	$F(z)$	$f(kT)$
$\delta(t)$	$\frac{1}{1-z^{-1}}$	$\delta(kT)$
$u(t)$	$\frac{Tz^{-1}}{(1-z^{-1})^2}$	$u(kT)$
$tu(t)$		$kTu(kT)$

$\sin(\omega t) u(t)$	$\frac{\sin(\omega T) z^{-1}}{1 - 2 \cos(\omega T) z^{-1} + z^{-2}}$	$\sin(\omega kT) u(kT)$
$\cos(\omega t) u(t)$	$\frac{1 - \cos(\omega T) z^{-1}}{1 - 2 \cos(\omega T) z^{-1} + z^{-2}}$	$\cos(\omega kT) u(kT)$

N°	Fonction du temps : $f(t)$	Transformée de Laplace : $F(p)$
1.	$\delta(t)$	$\frac{1}{p}$
2.	$u(t)$	$\frac{1}{p^2}$
3.	$tu(t)$	$\frac{1}{p^3}$
4.	$t^n u(t)$	$\frac{n!}{p^{n+1}}$
5.	$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{p+a}$

$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{1 - e^{-aT} z^{-1}}$	$e^{-akT} u(kT)$
----------------	--------------------------------	------------------

Réponses :

Nom :

②

ExaB: J'apst le schéma :

$$C^*(p) = \left\{ [R_1^* G_1 + (R_2 G_2)^*] G_3 \right\}^*$$

$$= [R_1^* (G_1 G_3)^* + (R_2 G_3)^* G_2^*]$$

Si les graphes des signaux de $S_1(t)$ et $S_2(t)$ on écrit.

* $R_1(t) = 5 + 5e^{-0.4t} + 5e^{-0.8t} z^{-2}$ car \leftarrow (1pt)

$V_1(t) = 5\delta(t) + 5e^{-0.1 \times 4} \delta(t - T_c) + 5e^{-0.1 \times 8} \delta(t - 2T_c)$

* $(G_1 G_3)^*$: $\left\{ \frac{1}{p+0.1} \cdot \frac{10}{p} \right\}^* = \frac{10}{3} \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{p+0.1} \right)^*$ \leftarrow (1pt)

$$\frac{10}{3} \left(\frac{e^{Tp}}{e^{Tp}-1} - \frac{e^{Tp}}{e^{Tp}-e^{-0.1T}} \right) \frac{1}{z} = \frac{z}{(z-1)(z-0.9)}$$

* $(R_2 G_2)^* = (R_2(p) \times e^{-4p})^* = e^{-4p} (R_2(p))^*$ \leftarrow (1pt)

Adonc $G_2^*(t) = (6 \sin \frac{2\pi}{12} t)^* = 6 \sin \frac{2\pi}{12} \cdot 4 \delta(t-4)$

+ $6 \sin(\frac{2\pi}{12} \cdot 8) \delta(t-8)$ avec $T_c = 4$ sec. \leftarrow (1pt)

Avec $\frac{z}{z-1} (R_2 G_2)^* = \frac{z}{z-1} \times (q_1 z^{-1} - q_2 z^{-2})$ Adonc

$$q_1 = 6 \sin(\frac{2\pi}{12} \cdot 4) \cdot -$$

* $G_3(t) = \frac{10 \cdot t}{z-1}$

D'ou l'expression de $C^*(z) = \frac{z}{(z-1)(z-0.9)} \times [5 + 5e^{-0.4} z^{-1} + 5e^{-0.8} z^{-2}]$

$$+ 6 \sin \frac{2\pi}{12} (z^{-2} - z^{-3})$$

$C(w)$? $\alpha(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} C(z) = 33.3$ \leftarrow (1pt)

UNIVERSITÉ ECHAHID HAMMA LAKHDAR EL-OUED

Corrigé de l'épreuve : Qualité de l'Energie Electrique
 Spécialité : ELT- Commande
 Enseignant : Chennoufi Hakim
 Nombre de pages : 1

Session: Juin 2021
 Durée : 1 heure
 Documents : Non autorisés
 Barème : 10 – 10

RECOMMANDATIONS

- Il vous est demandé de répondre aux questions de façon synthétique, claire et précise.
- Les copies illisibles ou rédigées au crayon à papier et au stylo rouge ne seront pas corrigées.

La notation tiendra compte des recommandations ci-dessus.

❖ Partie 1. Compléter les pointillés : 10 points

Dégradation de la qualité de la tension – Phénomènes perturbateurs

Donner l'équation correspondant à l'interprétation la plus correcte de la qualité de l'électricité.	Qualité de l'Electricité = Continuité + Qualité de la Tension 2
Citer trois natures des surtensions.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Temporaires à fréquence industrielle, 0,5 ➤ De manœuvre, 0,5 ➤ D'origine atmosphérique. 0,5
Dans un système triphasé on a : $I_A = 600 \text{ A}$, $I_B = 630 \text{ A}$, $I_C = 570 \text{ A}$. Calculer le taux de déséquilibre.	Le courant moyenne : $I_{\text{moyenne}} = (600+630+570) / 3 = 600 \text{ A}$ 1 Le courant qui présente le plus grand écart par rapport I_{moyenne} : $\Delta I = 630 \text{ A} - 600 \text{ A} = 30 \text{ A}$ 1 $\sigma_{\text{déséquilibre}} = (30 \text{ A} \div 600 \text{ A}) \times 100 = 5 \%$ (déséquilibre très élevé) 1
De point de vue fréquence, compatibilité électromagnétique (CEM) et la qualité de l'électricité, en quoi sont-ils différents ?	la Qualité de l'Electricité se soucie des perturbations à basse fréquence, la CEM se soucie des perturbations à haute fréquence. 2
Citer trois causes de déséquilibre de tension.	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Mauvaise répartitions de l'éclairage publique, 0,5 ➤ Fusion fusible BT, 0,5 ➤ Mauvais raccordement (mauvais contact). 0,5

❖ Partie 2. Cochez vrai ou faux et justifier par une observation ou un calcul : 10 points

	vrai	faux
Un creux de tension peut résulter de phénomènes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).	V 0,5	.....
Parmi les origines de déséquilibre, la fusion fusible BT.	0,5 V	.....
Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement des phases.	.....	1 F Du conducteur neutre.
Les réseaux de distribution aériens HTA et BT sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine magnétique.	.....	1 F atmosphérique
Les surtensions de manœuvre découlent d'une modification de la structure des transformateurs HTA.	.....	1 F Du réseau électrique (bouclage des départs HTA).
Les creux de tension sont des perturbations brèves mais fréquentes qui touchent tous les réseaux électriques et peuvent être évitées totalement.	.....	1 F Ne peuvent être évitées totalement.
Les surtensions temporaires à fréquence industrielle ne sont pas à la même fréquence que celle du réseau.	..... 1,5	F Sont à la même fréquence que celle du réseau.
Plus la fréquence du courant est élevée, moins le courant pénètre au cœur du conducteur. La section utile de conduction étant réduite, il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur.	V 1,5 Effet de peau.	.....
Pour les lignes aériennes, le cuivre n'est pas utilisé car il est trop lourd !	V On utilise des alliages plus légers, dont la résistivité est faible. 1,5	.....
Le réseau interconnecté national (RIN) varie de 60 à 400 kV.	V 0,5	.....

Examen de modélisation et identification des systèmes électriques

Nom et Prénom:

Matricule :

Spécialité :

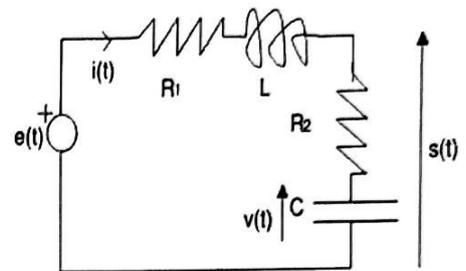
G :

Exercice 01 :(06pts)

1. Donner le modèle d'état de ce système. On choisit

comme variable d'état $x = [v(t) \ i(t)]$

2. Modéliser le système par des équations différentielles.



1.
$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{C} i(t) \\ \frac{di}{dt} &= -\frac{1}{L} (R_1 + R_2) i(t) - \frac{1}{L} v(t) + \frac{1}{L} e(t) \end{aligned} \right.$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{v}(t) \\ \dot{i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/C \\ -1/L & -(R_1 + R_2)/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(t) \\ i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \end{bmatrix} e(t)$$

l'équation de sortie $y = [1 \ R_2] \begin{bmatrix} v(t) \\ i(t) \end{bmatrix} + [0] e(t)$

2. $e(t) = (R_1 + R_2) i(t) + L \frac{di}{dt} + v(t)$ et $i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$

2 pt

$$\Rightarrow LC \frac{d^2 v(t)}{dt^2} + C(R_1 + R_2) \frac{dv(t)}{dt} + v(t) = e(t)$$

Exercice 02 : (09pts) On considère le système électromécanique décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + K_3 \frac{d\theta}{dt} = K_1 e \\ J \frac{d^2\theta}{dt^2} + f \frac{d\theta}{dt} = K_2 i_a \end{cases}$$

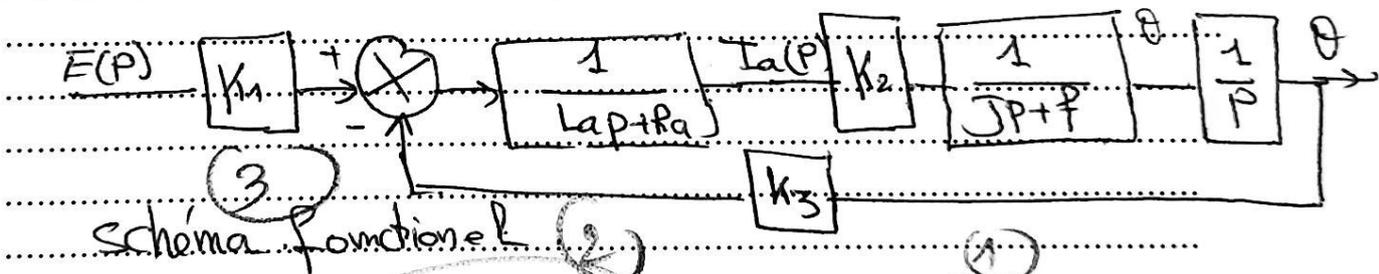
- Déterminer la fonction de transfert $H(P) = \frac{\theta(P)}{E(P)}$ et donner le schéma fonctionnel.
- Trouver la représentation d'état on choisi le vecteur d'état $X = \begin{bmatrix} i_a \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$ et la sortie mesuré si le courant i_a et la vitesse angulaire $\dot{\theta}$.

1. \xrightarrow{TL}

$$\begin{cases} (L_a p + R_a) I_a(p) + K_3 P \theta(p) = K_1 E(p) \quad (1) \\ (J p^2 + f p) \theta(p) = K_2 I_a(p) \quad (2) \end{cases}$$

(2) $\Rightarrow I_a(p) = \frac{1}{K_2} P (J p + f) \theta(p)$ et remplacer dans (1)

$$H(p) = \frac{\theta(p)}{E(p)} = \frac{K_1 K_2}{P [(L_a p + R_a)(J p + f) + K_3]}$$



2.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ i_a \\ \dot{\theta} \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_a/L_a & 0 & -K_3/L_a & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ K_2/J & 0 & -f/J & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \theta \\ \dot{\theta} \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1/L_a \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} e(t)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

Exercice 03 : (05pts)

À partir de la réponse indicielle unitaire d'un système. On relevé graphiquement par la méthode de Strejc les paramètres suivant : $S_f=4.7$, $T_1=0,8s$, $T_2=2s$.

n	$\frac{T_1}{T}$	$\frac{T_2}{T}$	$\frac{T_1}{T_2}$
1	0	1	0
2	0.28	2.72	0.1
3	0.8	3.7	0.22
4	1.42	4.46	0.32
5	2.10	5.12	0.41
6	2.81	5.70	0.49

1. Identifier le modèle $H(P)$ selon Strjc.

$$H(P) = K \cdot \frac{e^{-TP}}{(1+\tau P)^n}$$

• $K = 4,7 \cdot (0,5)$

• $\frac{T_1}{T_2} = 0,4 \Rightarrow n = 4 \quad (1)$

• $\frac{T_2}{\tau} = 4,46 \Rightarrow \tau = 0,44 \quad (1)$

• $\frac{T_1}{\tau} = 1,42 \Rightarrow T_1 = 0,624 \quad (1)$

$T = T_{1\text{ calculé}} - T_{1\text{ graphique}} = 0,175 \quad (0,5)$

$$H(P) = 4,7 \cdot \frac{e^{-0,175P}}{(1+0,44P)^4} \quad (1)$$

الإجابة النموذجية لامتحان السداسي الثاني للدورة العادية

الجزء الأول: أجب على الأسئلة التالية: (08 نقاط)

1- اشرح المصطلحين : الأخلاق، الفساد ؟ (03 نقاط)

الأخلاق: هي عادات يكتسبها الفرد نتيجة تعرضه لمؤثرات الأسرة والمدرسة والمجتمع والبيئة، وتنطبع في نفسه ويتمثلها في تصرفاته في المواقف المختلفة.

الفساد: هو إساءة استعمال السلطة التي أوّمن عليها الشخص لتحقيق مصالح شخصية.

2- حدد مصادر أخلاقيات المهنة (دون شرح)؟ (2.25 نقطة)

الدين – القيم والثقافة – القانون.

3- أذكر القيم الأساسية للسلوك المهني وأخلاقيات الوظيفة العامة (دون شرح)؟ (2.75 نقطة)

الامتياز- الاجتهاد – النزاهة – الصدق والأمانة- الموضوعية – الحيادية – الاقتصاد – الكفاءة – الشفافية – الريادة- السرية.

الجزء الثاني: أجب بـ (صحيح) أو (خطأ) مع تصحيح الإجابة الخاطئة. (12 نقطة).

1- يعتبر الفساد الأخلاقي أحد أنواع الفساد من حيث الانتشار.

خطأ : يعتبر الفساد الأخلاقي أحد أنواع الفساد من حيث المظهر. (02 نقطة)

2- الموضوعية هي بعد الموظف عن كل ما يثير الشبهة والالتزام برد الحقوق الملقاة عليه في العمل.

خطأ : الموضوعية هي الإبتعاد عن كل ما هو شخصي ودون تحيز. (02 نقطة)

3- الرشوة هي الحصول على أموال الدولة والتصرف بها من غير وجه حق وتحت مسميات مختلفة.

خطأ: هي الحصول على أموال أو أية منافع أخرى من أجل تنفيذ عمل أو الامتناع عن تنفيذه. (02 نقطة)

4- الشفافية تعني التصرف فقط طبقا لوقائع المسألة المطروحة، وخدمة الرؤساء و عامة الناس بشكل متساو.

خطأ: هي أتباع أسلوب الوضوح والعلانية في التعامل مع الجمهور من خلال الإجراءات والغايات والأهداف العامة. (02 نقطة)

5- عدم توزيع الثروة بشكل عادل بين أفراد المجتمع يعتبر من الأسباب الحضارية للفساد.

خطأ: عدم توزيع الثروة بشكل عادل بين أفراد المجتمع يعتبر من الأسباب الاقتصادية للفساد. (02 نقطة)

6- الفساد الاجتماعي هو الذي يؤدي بالمرء إلى الانحطاط في سلوكياته بصورة لا تجعله يحكم عقله.

خطأ: الفساد الأخلاقي هو الذي يؤدي بالمرء إلى الانحطاط في سلوكياته بصورة لا تجعله يحكم عقله. (02 نقطة)

Partie N° 1 (10 pts):

- 1- Définir les lettres dans l'abréviation « FDI » pour le domaine de diagnostic des défauts dans les machines électriques.
- 2- Quelle est la différence entre un défaut et une panne ?
- 3- Quels sont les défauts qui peuvent affecter la MAS (brièvement : باختصار)?
- 4- Expliquer le phénomène physique apparu dans le rotor à cage lorsqu'on aura une cassure totale d'une barre rotorique (brièvement : باختصار).
- 5- Expliquer brièvement (باختصار) le principe de la technique d'analyse du courant statorique (analyse spectrale).
- 6- Pourquoi utilise-t-on l'échelle décibel (dB) dans les analyses fréquentielles (brièvement : باختصار)?
- 7- Noter précisément les points de mesures du champ magnétique extérieur d'une machine électrique tournante.
- 8- Citer 03 causes et 03 conséquences des défauts dans les MAS.

Partie N° 2 (10 pts):

Soit une MAS a les caractéristiques suivantes: Nombre de barres rotoriques $N_r=28$, un glissement de $g=0.04$, un nombre de paires de pôles $p=2$, fréquence d'alimentation $f_s=50\text{Hz}$.

- 1- Soit un défaut de la cassure des barres (CB); calculer les 04 fréquences caractéristiques apparaissent dans le spectre du courant statorique f_{CB} pour $k=1$ (+ et -) et pour $k=2$ (+ et -).
- 2- Soit la fréquence caractéristique du défaut dans la bague externe (BE) pour $k=1$ (-) dans le spectre courant statorique est $f_{BE}^- = (f_s - 0.4 \times k \times N_b \times f_r) = 36,4\text{Hz}$.
 - Calculer la fréquence rotorique f_r en déduisant la valeur du nombre de billes du roulement N_b .
 - Soit $f_{BE}^{(+,-)} = |f_s \pm 0.4 \times k \times N_b \times f_r|$, calculer les fréquences caractéristiques du défaut dans la bague externe (BE) pour $k=2$ (+ et -) et $k=3$ (+ et -).
- 3- Calculer les fréquences caractéristiques du défaut d'excentricité mixte (f_{EMix}) pour $k=1$ (+ et -).

BONNE REUSSITE

بالتوفيق للجميع

Partie 1:

1) F: Fault / D: Detection / I: Identification

FDI: Fault Detection and Identification

2) Défaut: le système reste fonctionnel, mais dans le cas d'une panne, le système s'arrête.

3) Les défauts sont:

a) Statoriques: CC entre spires, CC entre bobines, CC entre phases, Ouverture d'une phase, défaut phase à la terre.

b) Rotorique: Cassure de barre, Excentricité (Statique, Dynamique, Mixte)

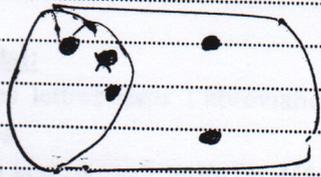
c) Roulement: Billes, BE, BI, Cage.

4) La CB conduit à une augmentation du courant dans les autres barres.

5) L'analyse du courant se base sur la reconnaissance du contenu harmonique.

Quand les signaux grille les harmoniques qui sont différents pour un signal et une autre.

1) On utilise l'échelle dB pour avoir un zoom en niveau d'amplitude
 A) Points du champ magnétique :



• : les points de mesure.

8) Causes : surtension / surintensité / surcharge
 Conséquences : Vibration / Oscillation / du couple / perturbation de vitesse.

Partie 2

1) $f_{CB} = (1 \pm 2g) f_s$

$f_{CB}^{(1,+)} = (1 + 2g) f_s = 54 \text{ Hz}$
 $f_{CB}^{(1,-)} = (1 - 2g) f_s = 46 \text{ Hz}$
 $f_{CB}^{(2,+)} = (1 + 4g) f_s = 58 \text{ Hz}$
 $f_{CB}^{(2,-)} = (1 - 4g) f_s = 42 \text{ Hz}$

2) On a : $f_{BE}^- = |f_s - 0,4 N_b f_r| = 36 \text{ Hz}$ or $f_s - 0,4 N_b f_r = 36 \text{ Hz}$

$f_r = (1 - g) f_s = 24 \text{ Hz}$ $N_b = \frac{-36 - 50}{-0,4 f_r} \approx 9 \text{ billes}$

$f_{BE}^{(2,+)} = |f_s + 0,4 \times 2 \times 9 f_r| = 222,8 \text{ Hz}$

$f_{BE}^{(2,-)} = 122,8 \text{ Hz}$

$f_{BE}^{(3,+)} = 309,2 \text{ Hz}$

$f_{BE}^{(3,-)} = 209,2 \text{ Hz}$

3) $f_{EMix}^{(1,+)} = |f_s + f_r| = 74 \text{ Hz}$

$f_{EMix}^{(1,-)} = 26 \text{ Hz}$