

GEL-4100/7063 COMMANDE INDUSTRIELLE

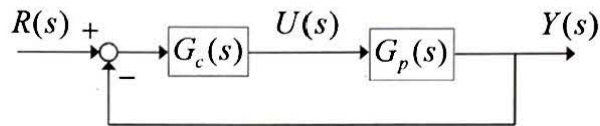
Examen 1
19 octobre 2018, 8h30 à 11h20

Document permis : une feuille manuscrite recto verso (8.5" x 11")
Justifiez vos calculs et raisonnements

Éric Poulin, Département de génie électrique et de génie informatique

QUESTION 1 (16 points)

On considère la boucle de rétroaction présentée à la figure suivante.



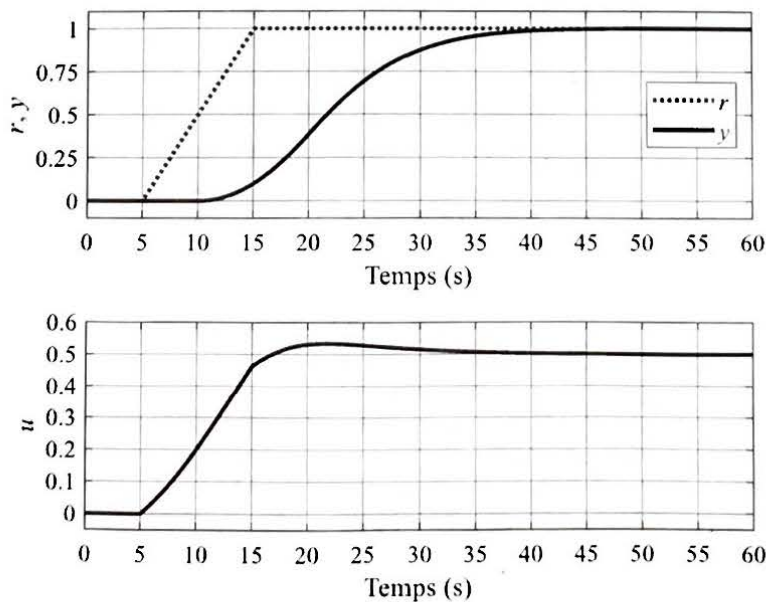
Les fonctions de transfert du régulateur et du procédé sont :

$$G_c(s) = \frac{K_c(T_i s + 1)}{T_i s} \quad , \quad G_p(s) = \frac{K_p e^{-\theta}}{T_1 s + 1}$$

Sachant que le réglage des paramètres du régulateur a été effectué avec les relations

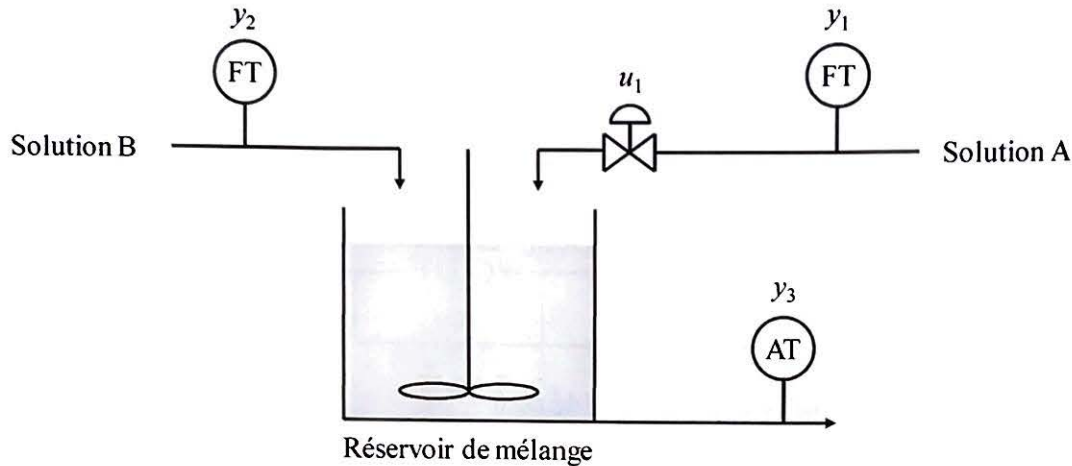
$$K_c = \frac{1}{K_p} \frac{T_1}{T_1 + \theta} \quad , \quad T_i = T_1$$

et en utilisant la réponse du système à la figure ci-dessous, donnez les valeurs numériques de K_c , T_i et T_1 . Expliquez votre démarche.



QUESTION 2 (24 points)

Le système étudié est présenté à la figure suivante. Il s'agit d'un réservoir de mélange dans lequel les solutions A et B sont mélangées afin d'obtenir la composition désirée en sortie (u_1 : ouverture de la vanne; y_1 : débit de solution A; y_2 : débit de solution B; y_3 : composition de la solution en sortie).



Concevez une commande cascade qui permet de réguler la composition de la solution à la sortie du réservoir en manipulant le débit de solution A. Votre stratégie doit aussi inclure une anticipation de la variation du débit de solution B (perturbation mesurable).

- (10 points) Tracez le diagramme fonctionnel de votre stratégie de commande en identifiant clairement chacun des signaux;
- (14 points) Vous disposez des modèles suivants (déterminés au point d'opération) :

$$\frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{1.2}{3s+1}, \quad \frac{Y_3(s)}{U_1(s)} = \frac{2.4}{(10s+1)(3s+1)}$$

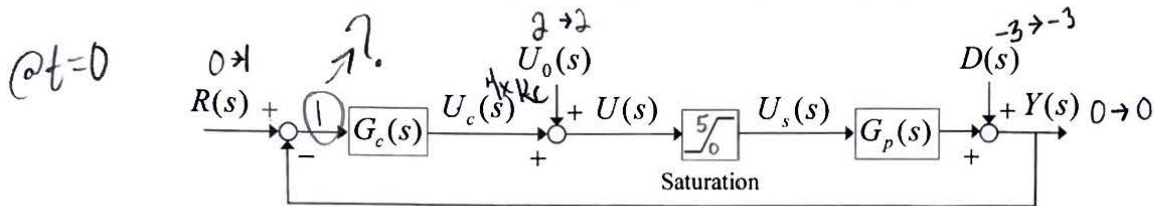
et vous savez que

$$\frac{Y_3(s)}{Y_2(s)} \approx \frac{-Y_3(s)}{Y_1(s)}$$

Calculez les régulateurs de façon à ce que la boucle de débit de solution A réponde selon une dynamique de premier ordre $T_{Hd} = 2$ s et que la boucle de composition réponde approximativement selon une dynamique de premier ordre $T_{Hc} \approx 10$ s. Donnez la fonction de transfert du régulateur d'anticipation sous forme numérique. Si vous faites des hypothèses ou des approximations, expliquez-les clairement.

QUESTION 3 (18 points)

Le système considéré est présenté à la figure ci-dessous. Il s'agit d'une boucle de rétroaction pour laquelle l'actionneur comporte une saturation dont les niveaux minimum et maximum sont 0 et 5.



La fonction de transfert du régulateur est

$$G_c(s) = \frac{K_c (T_i s + 1)(T_d s + 1)}{T_f s (T_f s + 1)}, \quad K_c > 0, \quad T_i \geq T_d \geq T_f \geq 0$$

et celle du procédé est

$$G_p(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)}, \quad T_1 \geq T_2 \geq 0$$

Le système fonctionne à trois points d'opérations distincts notés A, B, et C. La valeur de K_p et celle de θ changent selon le point de fonctionnement comme l'indique le tableau ci-dessous alors que T_1 et T_2 sont constantes.

Point d'opération	θ (s)	K_p
A	3	1
B	6	1
C	6	1.5

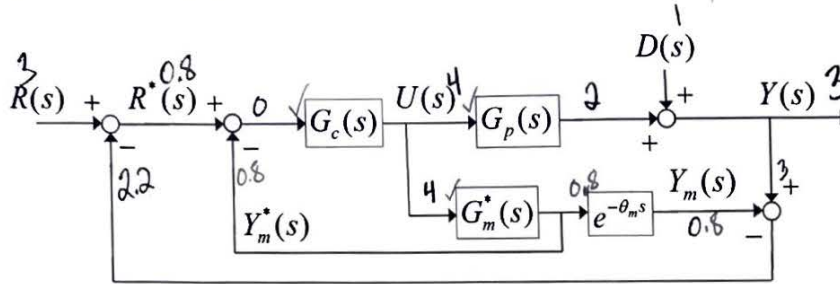
gain scheduling

Considérez les sous-questions suivantes de manière indépendante.

- (6 points) Pour quel point d'opération le réglage PID devrait-il être effectué afin d'assurer la plus grande robustesse du système sur toute la plage d'opération (expliquez)? Supposez que le réglage est effectué par annulation des pôles et zéros et que le régulateur est le même pour les trois points d'opération.
- (4 points) Pour un réglage donné, la marge de phase au point B est $M_p = 60^\circ$ (mesurée à $\omega_0 = 0.075$ rad/s). Quelle est la marge de phase au point A pour ce même réglage?
- (8 points) Le système est initialement en régime permanent au point d'opération C avec $r = 0$ et $u_0 = 2$ et $d = -3$. À l'instant $t = 0$, la consigne est changée pour $r = 1$ sous forme d'échelon. Quelle valeur du gain proportionnel K_c amène le signal u exactement à la limite de la saturation maximale à $t = 0^+$, sachant que $T_d/T_f = 4$?

QUESTION 4 (18 points)

Ci-dessous, une structure de commande de type prédicteur de Smith.



Les fonctions de transfert du système asservi sont :

$$G_c(s) = \frac{1.5(12s+1)}{12s}, \quad G_p(s) = \frac{0.5e^{-9s}}{12s+1}, \quad G_m(s) = \frac{K_m}{12s+1}$$

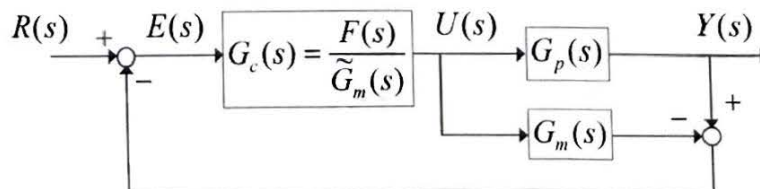
- (6 points) Lorsque $K_m = 0.5$, $\theta_m = 9$ s et $d = 0$, donnez le temps de réponse à $\pm 5\%$ de la valeur finale pour un échelon de consigne;
- (6 points) Pour $r = 0$, montrez que le système élimine l'erreur en régime permanent lorsque la perturbation d est un échelon sachant que

$$Y(s) = \frac{G_c(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-\theta_m s}) + G_c(s)G_p(s)} R(s) + \frac{1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-\theta_m s})}{1 + G_c(s)G_m(s)(1 - e^{-\theta_m s}) + G_c(s)G_p(s)} D(s)$$

- (6 points) Dans le cas où $K_m = 0.2$, $\theta_m = 11$ s, donnez la valeur de tous les signaux du système asservi en régime permanent lorsque $r = 3$ et $d = 1$;

QUESTION 5 (18 points)

La structure de commande étudiée est illustrée ci-dessous. Les fonctions de transfert $G_p(s)$, $G_m(s)$, $\tilde{G}_m(s)$ et $F(s)$ représentent respectivement le procédé, le modèle, la partie inversible du modèle et le filtre spécifiant la dynamique désirée.



Considérez les sous-questions suivantes de manière indépendante.

- a) (8 points) Dans le cas où $G_m(s) = G_p(s) = \frac{3(20s+1)e^{-9s}}{(15s+1)(7s+1)}$, déterminez le régulateur $G_c(s)$ permettant d'obtenir une dynamique $\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{e^{-9s}}{18s+1}$. Si c'est impossible, expliquez pourquoi;
- b) (4 points) L'asservissement est stable et $G_m(s) = G_p(s)$. Sachant que $G_c(s) = \frac{0.5(16s+1)}{(11s+1)}$, est-ce que la dynamique du système en boucle fermée est plus rapide que celle du procédé en boucle ouverte (expliquez)?
- c) (6 points) Dans le cas où $G_m(s) = G_p(s)$ et que le gain statique du modèle est $G_m(0) = 4$, déterminez le régulateur $G_c(s)$ permettant d'obtenir une dynamique en boucle fermée identique à celle du procédé en boucle ouverte sans erreur statique. Expliquez votre démarche.

QUESTION 6 (6 points)

Répondez par *vrai*, *faux* ou *abstention*. Une question non répondue est interprétée comme *abstention*. Une bonne réponse vaut 2 points. Une mauvaise réponse vaut -1 point. La réponse *abstention* vaut 0 point. Exceptionnellement pour cette question, il n'est pas nécessaire de justifier vos réponses.

- a) L'utilisation du rapport y_{op}/u_{op} est une méthode appropriée pour l'estimation du gain statique d'un procédé autorégulant (y_{op} et u_{op} sont respectivement la sortie et l'entrée du procédé au point d'opération);
- b) Un dispositif « anti-windup » pour éviter l'emballement de l'action intégrale est inutile lorsque les seuils de saturation minimal et maximal de l'actionneur sont 0 % et 100 %;
- c) L'application de l'action dérivée à la variable de procédé au lieu du signal d'erreur affecte la réponse en poursuite d'une boucle de rétroaction PID;