Automatique continue

Correcteurs standards et leurs réglages

Hugues Garnier

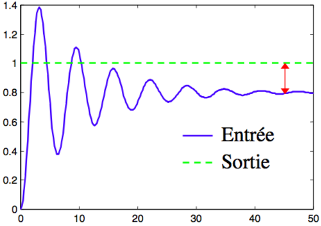
hugues.garnier@univ-lorraine.fr

Version du 21 octobre 2020

Plan du cours

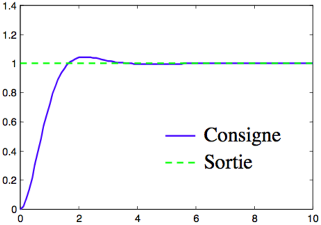
Objectifs d'un contrôle

Système à commander



- Réponse oscillatoire
- Réponse mal amortie
- Ecart avec l'entrée en régime établi

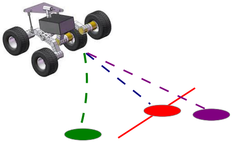
Comportement désiré

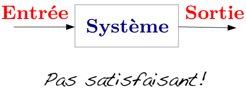


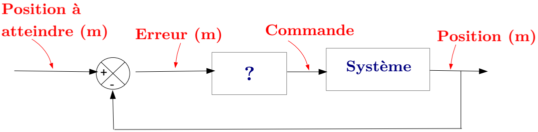
- Réponse oscillatoire
- Réponse bien amortie
- Erreur statique nulle

Pour corriger le comportement du système : un correcteur

Objectifs d'un contrôle







Le correcteur va générer automatiquement le signal de commande à partir du signal d'erreur?

→ Quelle forme choisir pour le correcteur ?

Choix du type de correcteur

Pour les systèmes ayant une réponse indicielle de type apériodique décrit par :

$$G(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$$

avec

- τ : le retard pur
- T : la constante de temps dominante

Le type de correcteur peut être choisi en fonction de la valeur de T par rapport à τ à l'aide du tableau suivant

Constante de temps / retard	Correcteur le mieux adapté
$T > 20\,\tau$	TOR
$10\,\tau \leq T \leq 20\,\tau$	P
$5\,\tau \leq T \leq 10\,\tau$	PI
$2\,\tau \leq T \leq 5\,\tau$	PID
$T \leq 2\,\tau$	Limite des PID Prédicteur de Smith,...

Correcteurs TOR

Principe

Un contrôle tout ou rien (TOR) (*bang-bang control ou on-off control)* ne peut générer que deux états pour l'actionneur : marche-arrêt. Dans un contrôle TOR ou assimilés (TOR à hystérésis, avec zone morte ou non), la valeur de la sortie n'est prise en compte que lors du franchissement de seuils.

Principales caractéristiques

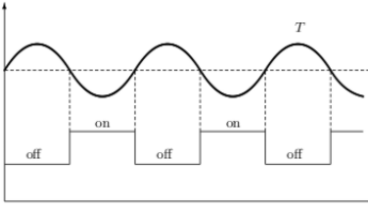
- simple et bon marché
- ne nécessite pas un modèle très précis de la dynamique du système
- malgré sa simplicité, la commande TOR est difficile à analyser à cause de sa non-linéarité

Domaines d'application

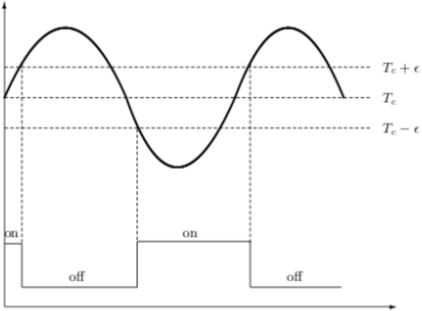
- systèmes ayant une grande inertie où la précision de régulation n'est pas cruciale
- applications de la vie quotidienne : système de chauffage, four, système de climatisation, réfrigérateur,...

Correcteurs TOR

Pour éviter de passer très souvent de "On" à "Off", et inversement, dès que l'erreur change de signe et ainsi réduire le nombre de commutations on/off et par là l'usure de l'organe de commande, on introduit souvent une hystérésis de largeur 2 ϵ



Contrôle TOR sans hystérésis



Contrôle TOR avec hystérésis

Correcteurs TOR

Rappel : un contrôle est souvent implanté dans un programme

Exemple d'algorithme

Le fonctionnement d'un four piloté par une commande TOR (avec hystérésis) peut être décrit par l'algorithme ci-dessous :

Données : T(t) : température du four
Données : Tmin (seuil mini); Tmax (seuil max)
Résultat : Chauffage : valeur binaire (vrai/faux)
début
tant que le four fonctionne **faire**
Lire T(t)
si T(t) $>$ Tmax **alors**
Chauffage $=$ faux
fin
si T(t) $<$ Tmin **alors**
Chauffage $=$ vrai
fin
fin
fin

Correcteurs PID

Principe

Un contrôle PID (*PID control)* exploite la mesure continue de la sortie pour ajuster la commande en exploitant l'une ou l'ensemble des trois actions : proportionnelle, intégrale et dérivée.

Principales caractéristiques

- bon marché
- très apprécié, bien qu'assez rudimentaire
- simple à régler
- offre souvent de bonnes performances avec des propriétés de robustesse que beaucoup d'autres correcteurs leur envient

Domaines d'application

- installations industrielles
- aujourd'hui encore, plus de 80% des régulations de pression, de débit, de température, de vitesse, de position, ... sont réalisées à l'aide de correcteurs PID ou assimilés

Exemple d'algorithme

Le fonctionnement d'un four piloté par une commande proportionnelle peut être décrit par l'algorithme ci-dessous :

Données : Tc : température de consigne du four
Données : T(t) : température du four
Données : K (gain du correcteur)
Résultat : Chauffage(t) : commande du four
début
tant que le four fonctionne **faire**
Lire T(t)
si $T(t) < Tc$ **alors**
Chauffage(t)= K (Tc-T(t))
fin
si $T(t) > Tc$ **alors**
Chauffage(t) = K (Tc-T(t))
fin
fin
fin

Exemple : suivi de trajectoire - Cas d'une voiture autonome

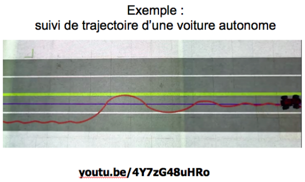
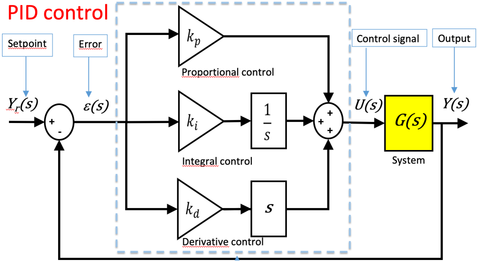


Figure: youtu.be/4Y7zG48uHRo

Voir vidéos de Brian Douglas sur les correcteurs PID :
www.youtube.com/watch?v=UR0hOmjaHp0

Ils sont caractérisés par 3 actions possibles :

- Action **P**roportionnelle
- Action **I**ntégrale
- Action **D**érivée



Voir transparents sur Effects of PID terms

Correcteurs PID

Le choix du type de correcteur est généralement dicté par sa faculté à corriger les lacunes du système asservi sans correcteur. Le tableau ci-dessous constitue un guide au choix du correcteur PID en fonction du modèle du comportement dominant du système. Ce guide peut être affiné en fonction du niveau de performances attendues.

Modèle du comportement dominant	Correcteur
$G(s) = \dfrac{K}{s}$	P
$G(s) = \dfrac{K}{1 + Ts}$	PI
$G(s) = \dfrac{Ke^{-\tau s}}{1 + Ts}$	PI ou PID ($T \leq 5\tau$)
$G(s) = \dfrac{K}{(1 + T_1 s)(1 + T_2 s)}$	PID

Table: Guide au choix du correcteur PID en fonction du modèle du comportement dominant du système

Réglage des correcteurs

Comment déterminer les 3 paramètres : K_p, T_i et T_d du correcteur PID ?

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

Il n'existe pas de méthode universelle de réglage !!

On peut exploiter l'une des méthodes suivantes :

- Méthode de réglage *(totalement)* empirique
- Méthodes de réglage semi-empirique (à base de modèle)
- Méthode du modèle de référence (à base de modèle)
- Méthode par minimisation d'un critère (à base de modèle)
- ...

Réglage des correcteurs

1. Méthode empirique

Principe : procédure par essais/erreurs pour déterminer les 3 paramètres : K_p, T_i et T_d du correcteur suivant :

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s\right)$$

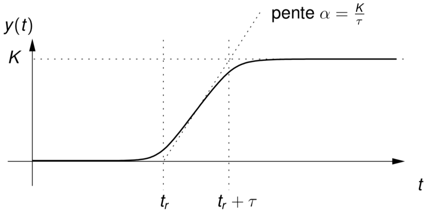
Avantage : pas besoin de modèle du système
Inconvénient : long et fastidieux, essais sur site nécessaires
Procédure itérative à partir de la réponse indicielle du système bouclé

1. Action proportionnelle
   Fixer $T_d = 0$ et $T_i = \infty$.
   Appliquer un échelon sur la consigne.
   Choisir K_p faible puis l'augmenter progressivement tant que les oscillations et dépassements restent tolérables.
2. Action dérivée
   Augmenter T_d jusqu'à ce que la réponse soit suffisamment amortie.
   Réajuster K_p si nécessaire.
3. Action intégrale
   Diminuer T_i jusqu'à ce que la sortie rattrape la consigne de façon suffisamment rapide.
   Si la réponse oscille de trop, diminuer K_p ou augmenter T_d.

Réglage des correcteurs

2. Méthode semi-empirique de Ziegler-Nichols (à base de modèle)

1. Identifier un modèle à partir de la réponse indicielle en boucle ouverte
2. Exploiter le tableau proposé par Ziegler-Nichols pour le réglage des actions PID



type de correcteur	coefficients du correcteur		
	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{1}{\alpha t_r}$		
PI	$\frac{0,9}{\alpha t_r}$	$\frac{t_r}{0,3}$	
PID	$\frac{1,2}{\alpha t_r}$	$2t_r$	$0,5t_r$

3. Méthode du modèle de référence (à base de modèle)

Principe

Imposer que la fonction de transfert en boucle fermée tende vers une fonction de transfert de référence (ou désirée) $F_{ref}(s)$

1. Déterminer un modèle $G(s)$ par identification ou modélisation
2. Déterminer la fonction de transfert du système en boucle fermée
   $F_{BF}(s) = \dfrac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$
3. Déterminer les paramètres du correcteur pour que $F_{BF}(s) = F_{ref}(s)$:

$$C(s) = \frac{F_{ref}(s)}{G(s)(1 - F_{ref}(s))}$$

Remarques

- Choix trop contraignant de $F_{ref}(s)$ peut conduire à un correcteur non réalisable !
- Dynamique trop rapide de $F_{ref}(s)$ entraîne des commandes de trop grandes amplitudes, dommageables pour le matériel

Réglage des correcteurs

3. Méthode du modèle de référence

a) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 1er ordre

Fonction de transfert du processus :

$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts}$$

Fonction de transfert désirée en boucle fermée :

$$F_{ref}(s) = \frac{1}{1 + T_{ref}s}$$

Correcteur :

$$C(s) = \frac{F_{ref}(s)}{G(s)(1 - F_{ref}(s))} = \frac{T}{KT_{ref}} \frac{1 + Ts}{Ts}$$

$\Rightarrow$ Correcteur PI de fonction de transfert $K_p \dfrac{1 + T_i s}{T_i s}$

avec $K_p = \dfrac{T}{KT_{ref}}$ et $T_i = T$

3. Méthode du modèle de référence

b) Comportement désiré du système bouclé = modèle du 2e ordre

Cahier des charges : la réponse indicielle du système bouclé doit satisfaire à des contraintes exprimées dans le domaine temporel.
Exemple de spécifications : erreur statique nulle, un premier dépassement $D_1 = 0.1$ et un temps de réponse à 5% $t_r^{5\%} = 5$ s

- Fonction de transfert désirée en boucle fermée (2eme ordre standard) :

$$F_{ref}(s) = \frac{1}{1 + \frac{2z}{\omega_0}s + \frac{1}{\omega_0^2}s^2}$$

- Gain statique = 1 $\Rightarrow$ erreur statique = 0
- Dépassement souhaité :

$$D_1 = e^{\frac{-\pi z}{\sqrt{1-z^2}}} \Rightarrow z = \sqrt{\frac{(\ln(D_1))^2}{\pi^2 + (\ln(D_1))^2}}$$

- Caractéristique temporelle souhaitée, par exemple :

$$t_r^{5\%} \approx \frac{3}{\omega_0 z} \Rightarrow \omega_0 = \frac{3}{t_r^{5\%} z}$$

4. Méthode de minimisation d'un critère

- On définit un critère pour donner une mesure objective de l'évolution de l'erreur en réponse à un échelon de consigne. Un exemple de critère est :

$$J(K_p, T_i, T_d) = \int_0^{+\infty} \varepsilon^2(t)dt$$

- Les paramètres K_p, T_i et T_d du correcteur sont ceux qui minimisent le critère choisi (utilisation d'un algorithme d'optimisation)

Réglage des correcteurs

5. Autres méthodes de réglage

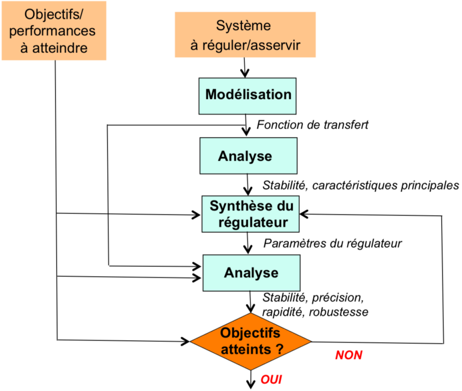
- Autres méthodes de réglage empirique et semi-empirique
- Méthodes de réglage par placement de pôles
- Méthodes de réglage dans le domaine fréquentiel
- ...

4. Autres méthodes de contrôle/commande

- Commande par anticipation (*feedforward control*)
- Commande cascade (*cascade control*)
- Correcteur de Smith (pour les systèmes à retard important)
- Commande prédictive (*predictive control*)
- Commande par retour d'état (pour les systèmes multivariables et/ou comportant plusieurs pôles instables)
- ...

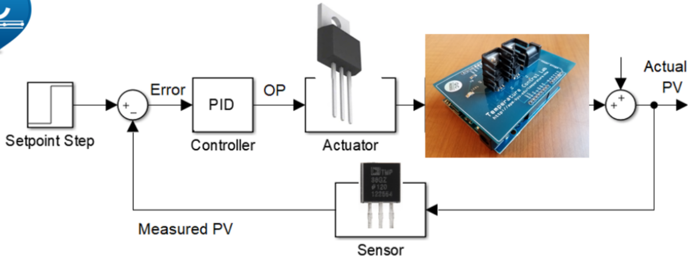
Maîtrise des outils pour modéliser, analyser et contrôler un système dynamique

Etapes de conception d'une commande en boucle fermée



Automatique en pratique : exemple d'une régulation de température

Visionnez la vidéo de Brian Douglas :
A real control system - how to start designing



Exploitation du kit pour tester votre savoir-faire lors de la première séance de TP