Industriell reglerteknik: Föreläsning 5

Martin Enqvist

Reglerteknik
Institutionen för systemteknik
Linköpings universitet

LINKÖPING UNIVERSITY

Föreläsningar

1	Sekvensstyrning: Funktionsdiagram, Grafcet.
2	Grundläggande reglerteori i diskret tid.
3	Modellering. Design av regulatorer.
4	Framkoppling från referenssignal. PID-regulatorn.
5•	PID-regulatorn. Implementering av regulatorer.
6	Regulatorer i drift. Olinjära regulatorer.
7	Regulatorstrukturer.
8	Regulatorstrukturer. MPC: Grundprincip, problemformulering.
9	MPC: Problemformulering, referensföljning, I-verkan.
10	MPC: Stabilitet.
11	Gästföreläsning
12	MPC: Tolkningar. Sammanfattning.

PID-regulatorn (forts.)

PID-inställning

Hur ställer man in en PID-regulator?

(i) Ad hoc
(ii) Mha optimering
(iii) Modellbaserat

Här: (iii)! Typiska delmoment:

1. Utför ett experiment (oftast: mät stegsvar eller självsvängning)
2. Anpassa en modell till data
3. Använd modellen för inställning av PID-parametrarna

IMC-baserad PID-inställning

IMC-regulator:

$$F(s) = \frac{Q(s)}{1 - Q(s)G(s)}$$

Det slutna systemet blir:

$$G_{ry}(s) = G(s)Q(s)$$

Välj:

$$Q(s) \approx \frac{1}{G(s)}$$

IMC-baserad PID-inställning...

System:

$$G(s) = \frac{K_p}{sT + 1}$$

Valet $Q(s) = 1/\big((sT_c + 1)G(s)\big)$ ger IMC-regulatorn

$$F(s) = \frac{T}{K_p T_c}\left(1 + \frac{1}{Ts}\right)$$

IMC-baserad inställningsregel för PI-regulator:

$$\boxed{K = \frac{T}{K_p T_c}, \qquad T_i = T}$$

IMC-baserad PID-inställning…

System:

$$G(s) = \frac{K_p}{sT + 1} e^{-sL}$$

Valet $Q(s) = (sT + 1)/\big(K_p(sT_c + 1)\big)$ (samma som förut) ger IMC-regulatorn

$$F(s) = \frac{sT + 1}{K_p(sT_c + 1 - e^{-sL})}$$

dvs. den förra PI-regulatorn med dödtidskompensering (smithprediktor).

IMC-baserad PID-inställning...

Med hjälp av padéapproximationen

$$e^{-sL} \approx \frac{1 - sL/2}{1 + sL/2}$$

kan man skriva om regulatorn som

$$F(s) \approx \frac{T + L/2}{K_p(T_c + L)} \left(1 + \frac{1}{(T + L/2)s} + \frac{TLs}{2(T + L/2)} \right)$$

IMC-baserad inställningsregel för PID-regulator:

$$\boxed{K = \frac{T + L/2}{K_p(T_c + L)}, \qquad T_i = T + L/2, \qquad T_d = \frac{TL}{2(T + L/2)}}$$

Lambdatrimning

System:

$$G(s) = \frac{K_p}{sT+1}e^{-sL}$$

Vid lambdatrimning av en PI-regulator använder man inställningsregeln

$$\boxed{K = \frac{T}{K_p(\lambda T + L)}, \qquad T_i = T}$$

Notera: Då $L = 0$ sammanfaller lambda- och IMC-trimning.

Ziegler-Nichols inställningsregler

Ziegler-Nichols inställningsregler för modellen

$$G(s) = \frac{b}{s} e^{-sL}$$

är

Regulator	K	T_i	T_d
P	$1/(bL)$		
PI	$0.9/(bL)$	$3L$	
PID	$1.2/(bL)$	$2L$	$L/2$

Ziegler-Nichols inställningsregler...

Ziegler-Nichols inställningsregler för modellen

$$G(i2\pi/T_u) = -1/K_u$$

är

Regulator	K	T_i	T_d
P	$0.5K_u$		
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$	
PID	$0.6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Specificering av punkt på nyquistkurvan

Genom parametervalet

$$\boxed{K = 0.35K_u, \qquad T_i = 0.76T_u, \qquad T_d = 0.19T_u}$$

baserat på modellen

$$G(i2\pi/T_u) = -1/K_u$$

specificerar man en lämplig punkt på kretsförstärkningens nyquistkurva.

Åström-Hägglunds inställningsregler

Åström-Hägglunds inställningsregler för placering av dominerade poler för modellen

$$G(s) = \frac{K_p}{1+sT} e^{-sL}, \quad a = K_p L/T$$

är

Regulator	K	T_i	T_d	α
PI	$0.4/a,\ (0.2/a)$	$0.7T$		$0.5,\ (1)$
PID	$0.9/a,\ (0.5/a)$	T	$0.25T$	$0.3,\ (0.5)$

Åström-Hägglunds inställningsregler...

Åström-Hägglunds inställningsregler för placering av dominerade poler för modellen

$$G(i2\pi/T_u) = -1/K_u$$

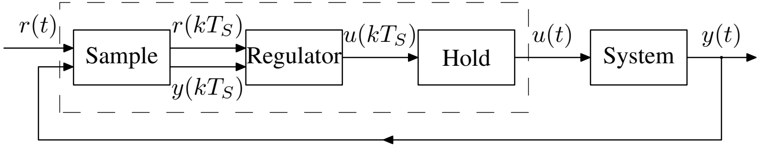
är

Regulator	K	T_i	T_d	α
PI	$0.2K_u,\ (0.1K_u)$	$0.2T_u$		$0.5, (1.2)$
PID	$0.5K_u,\ (0.25K_u)$	$0.3T_u$	$0.09T_u$	$0.2,\ (0.6)$

Implementering av regulatorer

Repetition: Samplad reglering

Reglering baserad på (ekvidistant) sampling av mätsignalerna:



Fördelar med samplad reglering: enkelt att implementera godtyckliga funktioner (t.ex. tidsfördröjningar, olinjäriteter, logiska uttryck), billigare hårdvara, bättre flexibilitet

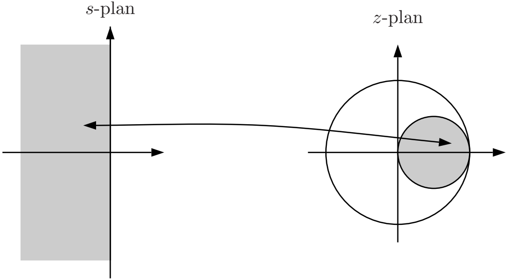
Nackdelar: fler parametrar att välja, kan försämra regleringen

Eulers metod

Eulers metod

$$\dot{u}(t) \approx \frac{1}{T_S}(u(t) - u(t - T_S)) \quad \text{eller} \quad s = \frac{1}{T_S}(1 - z^{-1})$$

avbildar VHP på en del av det inre av enhetscirkeln:

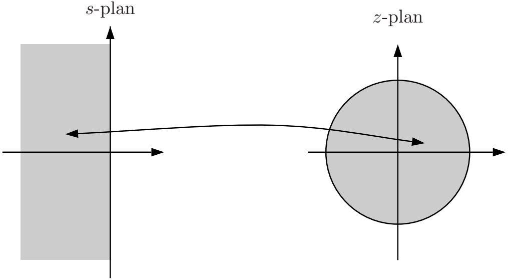


Tustins formel

Tustins formel (bilinjär transformation)

$$s = \frac{2(1 - z^{-1})}{T_S(1 + z^{-1})}$$

avbildar VHP på hela det inre av enhetscirkeln:



PID-implementering

En rättfram implementering av en PID-regulator:

$$I_k = I_{k-1} + K\frac{T_S}{T_i}e_k$$

$$v_k = Ke_k + I_k + K\frac{T_d}{T_S}(e_k - e_{k-1})$$

$$u_k = \begin{cases} u_{max}, & \text{om } v_k > u_{max} \\ v_k, & \text{om } u_{min} \leq v_k \leq u_{max} \\ u_{min}, & \text{om } v_k < u_{min} \end{cases}$$

Spara I_k och e_k till nästa beräkning.

Denna version ger dock problem med *integratoruppvridning* och en *bruskänslig D-del*. Mer om det strax!

PI-regulatorkod från lektion 4 och lab 2

```
function [un,xn]=computeux(umann,amn,rn,yn,xn_1,ctrlparam,ubounds,Ts)
K=ctrlparam(1); % PID parameters
Ti=ctrlparam(2);
Td=ctrlparam(3);
mu=ctrlparam(4);
theta=ctrlparam(5:end);
In_1=xn_1(1); % States
umin=ubounds(1); % Control signal limits
umax=ubounds(2);
en=rn-yn;
In=In_1+ K*Ts*en/Ti;
vn=K*en+In;
if vn<umin
    un=umin;
elseif vn>umax
    un=umax;
else
un=vn; end
xn=In;
```

Exempel: Implementering av generell modell

Antag att vi vill implementera en tidsdiskret approximation (som tagits fram med Tustins formel) av en dynamisk modell

$$G_{sys}(s) = \frac{s+2}{s^2+8s+2}$$

i vår regulator, som har sampeltiden $T_S = 0.2\,$s.

- Med hjälp av kommandona `tf`, `c2d` och `ss` kan vi ta fram en tidsdiskret tillståndsmodell som approximerar G_{sys}.
- Denna modell kan sedan inkluderas i regulatorkoden och användas för att simulera fram en filtrerad signal.
- Observera att modellen innehåller två tillståndsvariabler som vi måste uppdatera och spara vid varje exekvering av regulatorkoden.

Matlabdemo…

Exempel. . .

Beräkning av tidsdiskret tillståndsmodell:

```
Gsys=tf([1 2],[1 8 2])
Gsysd=c2d(Gsys,0.2,'tustin')
Gsysdss=ss(Gsysd);
format long
Gsysdss.A, Gsysdss.B, Gsysdss.C, Gsysdss.D
```

Tillägg till `computeux` (ändra även antal regulatortillstånd i Simulink):

```
xrn=xn_1(2:3);
F=[1.076923076923077  -0.483516483516484; 0.250000000000000 0];
G=[0.500000000000000; 0];
H=[0.185967878275571  -0.415408767057119];
I=0.065934065934066;
xrnp1=F*xrn+G*rn;
yrn=H*xrn+I*rn;
xn=[In;xrnp1];
```

Integratoruppvridning

Integratoruppvridning: Integraldelen har ökat till ett alldeles för stort värde pga. att styrsignalen har varit mättad.

Intuitiv förklaring:

Mättning av u
$\Rightarrow |e|$ stort onormalt länge
$\Rightarrow |I_k|$ alldeles för stort då e blir noll

Resultat: Dålig reglerprestanda!

Exempel: Integratoruppvridning

Samplad PID-reglering av systemet

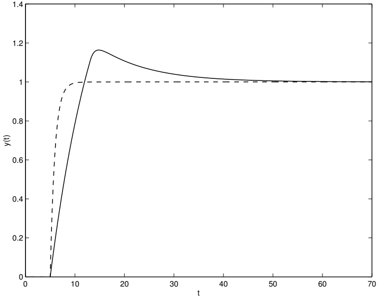
$$G(s) = \frac{10}{10s + 1}$$

med $T_S = 0.1$.

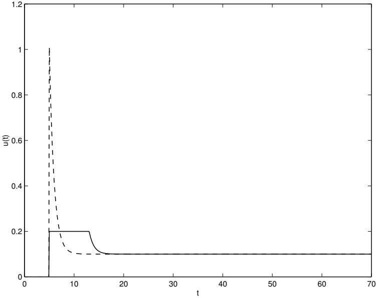
Regulatorparametrar: $K = 1$, $T_i = 10$, $T_d = 0$.
Begränsad styrsignal: $|u(t)| \leq 0.2$

Exempel. . .

Stegsvar (ett steg vid $t = 5$):



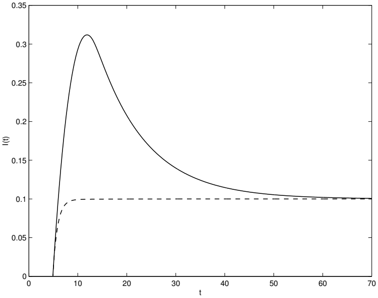
Utsignal



Styrsignal

Streckade kurvor är resultat utan styrsignalbegränsning.

Exempel. . .



I-del

Metoder mot integratoruppvridning

Villkorlig integration

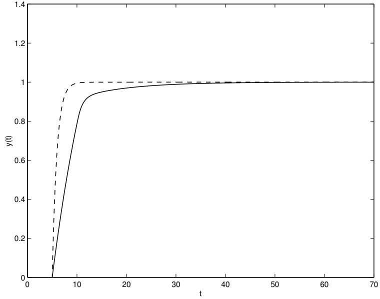
- Uppdatera bara I-delen om styrsignalen inte är mättad ($u_{min} \leq v_k \leq u_{max}$)
- Annars $I_k := I_{k-1}$

Justering av I-delen

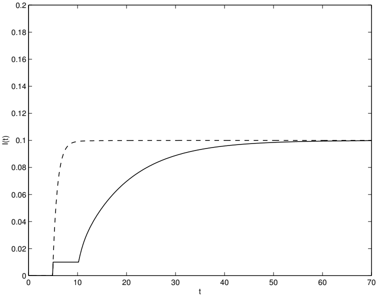
- Lägg till $I_k := I_k + \frac{T_S}{T_t}(u_k - v_k)$ sist i regulatorkoden
- Tumregel: $T_t \approx T_i$

Exempel: Villkorlig integration

Uppdatera bara I-delen när u inte är mättad.



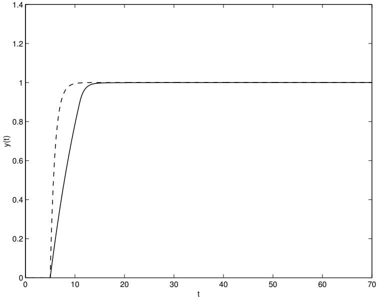
Utsignal



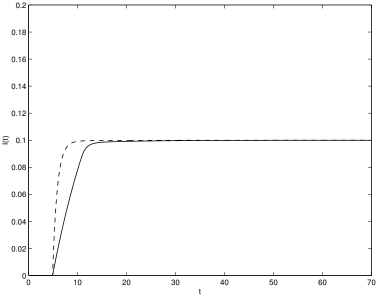
I-del

Exempel: Justering av I-del

$$T_t = T_i = 10 \Rightarrow T_S/T_t = 0.01$$



Utsignal



I-del

Stötfria övergångar vid modbyten

- I många tillämpningar vill man ibland koppla ur regulatorn och köra systemet manuellt.
- I manuell mod har operatören direkt kontroll över styrsignalen $\Rightarrow$ Regulatorns tillstånd (t.ex. I-delen) uppdateras inte

Problem: Vid återgång till automatisk mod får man hopp i styrsignalen.

Lösning: Justera I-delen så att man tvingar regulatorn att generera samma styrsignal som operatören.

Stötfria övergångar vid parameterbyten

Problem: Hopp i styrsignalen vid parameterbyten under drift.

Lösningar:

- Parametrisera regulatorn så att

$$
\begin{aligned}
P_k &= K e_k \\
I_k &= I_{k-1} + K \frac{T_S}{T_i} e_k \\
D_k &= K \frac{T_d}{T_S} (e_k - e_{k-1}) \\
v_k &= P_k + I_k + D_k
\end{aligned}
$$

(Redan gjort!)

Sammanfattning

PID-inställning:

- IMC- och lambdatrimning
- Ziegler-Nichols inställningsregler
- Specificering av punkt på nyquistkurvan
- Åström-Hägglunds inställningsregler

Implementering:

- Diskretisering mha Eulers metod eller Tustins formel
- Hantering av integratoruppvridning
- Stötfria övergångar

www.liu.se

LINKÖPING
UNIVERSITY