

Kapittel 11

Reguleringsstrukturer

Dette kapitlet beskriver diverse reguleringsstrukturer for industrielle anvendelser. I strukturene inngår én eller flere PID-reguleringsløyper.

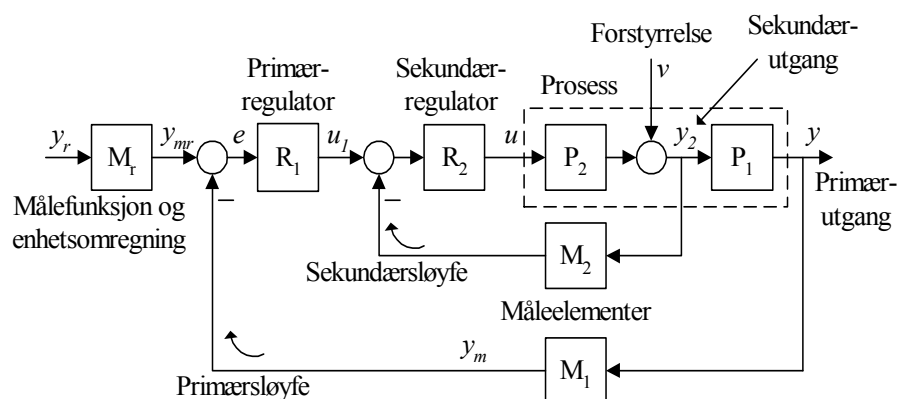
11.1 Kaskaderegulering

Vi vet fra tidligere kapitler at en reguleringsløyfe kompensere for forstyrrelser, slik at reguleringsavviket holder seg lite til tross for forstyrrelsen. Hvis regulatoren har integralvirkning, blir det statiske reguleringsavviket null, og hva mer kan vi ønske enn det? At transientforløpet av avviket blir mindre, dvs. at avviket svinger seg *raskere inn til null* og med *mindre maksimalverdi*. Dette kan oppnås med kaskaderegulering (eng.: cascade control), se figur 11.1.

Ved kaskaderegulering er det én eller flere reguleringsløyper inni hovedsløyfen eller primærsløyfen, og regulatorne står da i kaskade. Det er vanligvis én, men i noen anvendelser er det to (og til og med tre) indre sløyfer, inni primærsløyfen. Sløyfen inni primærsløyfen kalles *sekundærsløyfen*, og dens regulator kalles *sekundærregulatoren* (eller slave-regulatoren). Den ytre sløyfen kalles *primærsløyfen*, og dens regulator kalles primærregulatoren (eller master-regulator (eng.)). Primærregulatorens styresignal utgjør referansen for sekundærregulatoren.

I de fleste tilfeller er hensikten med den indre sløyfen å kompensere for forstyrrelsen før den slår ut på prosessens primærutgang¹, som jo er den variabelen som primært skal reguleres. For at dette skal kunne skje, *må*

¹en viss respons blir det allikevel



Figur 11.1: Kaskaderegulering

den indre sløyfen registrere eller “fange opp” forstyrrelsen vha. sitt måleelement, som er M_2 i figur 11.1.

I tillegg til at kompenseringen for forstyrrelser blir bedre, vil kaskaderegulering gjøre at det blir en *mer lineær sammenheng* mellom signalene u_1 og y_2 , se figur 11.1 enn ved vanlig énsøyferegulering. I mange anvendelser er prosessdel 2 (P_2 i figur 11.1) det samme som pådragsorganet. Sekundærsøyfen kan da betraktes som et nytt pådragsorgan med bedre linearitet (les gjerne: proporsjonalitet). Et eksempel er reguleringsventiler der strømningsregulering av ventilen gir en mer lineær sammenheng mellom ventilstyresignalet og strømmingen enn om det ikke var noen strømningsregulering.

Vi kan si at den forbedrede reguleringen som oppnås med kaskaderegulering, skyldes at reguleringen baseres på mer informasjon om prosessen – det er jo minst én ny måling. Det er et generelt prinsipp at jo mer informasjon du har om prosessen, jo bedre kan den reguleres.

Det trengs minst to målelementer i et kaskadereguleringssystem, som derfor blir (litt) dyrere enn et reguleringssystem med én sløyfe. Vanligvis trengs ikke mer reguleringsutstyr siden kommersielle regulatorer gjerne er tilrettelagt for kaskaderegulering (de har da to eller tre PID-regulatorer som kan benyttes i tillegg til primærregulatoren).

Sekundærsøyfen er effektiv mht. kompensering for forstyrrelser som har frekvenser opp til sløyfens båndbredde, som i denne forbindelsen bør angis ved -11 dB-båndbredden ω_s , jf. kap. 7.3.4.

Kaskaderegulering kan også forbedre reguleringssystemets evne til å følge

en varierende referanse, dvs. øke følgeegenskapene, men bare dersom sekundærsløyfen er raskere enn prosessdel P_2 i seg selv, jf. figur 11.1, slik at primærregulatoren da “ser” en raskere prosess. Hvis det er en tidsforsinkelse i P_2 , vil ikke sekundærsløyfen bli noe raskere enn P_2 (dette demonstreres i eksempel 47). I de fleste anvendelser er det imidlertid ikke forbedrede følgeegenskaper som er det viktigste, men forbedrede kompenseringsegenskaper.

For sekundærregulatoren er det mest vanlig å bruke P- eller PI-regulator. Man har ofte ikke så mye nytte av den større båndbredden som derivatvirkningen kan gi fordi prosessdel 2 typisk har raskere dynamikk enn prosessdel 1, så sekundærsløyfen blir allikevel rask. Dessuten er det alltid bra å slippe eventuell forsterkning av høyfrekvent målestøy (gjennom derivatleddet). Primærregulatoren er gjerne en PID- eller en PI-regulator.

Framgangsmåten for *innstilling* av regulatoren i et kaskadereguleringssystem er som følger:

- Sekundærregulatoren innstilles først, med primærregulatoren i manuell modus.
- Deretter innstilles primærregulatoren, med sekundærregulatoren i automatisk modus.

Innstillingen kan skje med hvilken som helst av innstillingsmetodene beskrevet foran i boken, f.eks. Ziegler-Nichols’ metoder eller ved å bruke auto-tuningen i regulatoren.

Eksempel 47 Kaskaderegulering (simulert prosess)

Vi skal se på noen simuleringer, der to reguleringssystemer simuleres (i parallell):

- Et kaskadereguleringssystem bestående av to reguleringssløyfer – primærsløyfen og sekundærsløyfen, som inneholder henholdsvis primærregulatoren, R_1 og sekundærregulatoren, R_2 .
- Et (vanlig) énsøyfereguleringssystem med regulatoren R . Dette reguleringssystemet simuleres for sammenlikningens skyld.

Begge reguleringssystemene i simuleringen påvirkes av den samme referansen, y_r , og av den samme forstyrrelsen, v . Prosessen som reguleres, består av to seriekoblede delprosesser, jf. figur 11.1:

- Delprosess P_1 , som er en treg prosess sammenliknet med delprosess P_2 :

$$y(s) = H_{P1}(s)y_2(s) \quad (11.1)$$

der

$$H_{P1}(s) = \frac{K}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta\frac{s}{\omega_0} + 1} e^{-\tau s} \quad (11.2)$$

med $K = 1$, $\omega_0 = 0,2$ rad/s, $\zeta = 1$ og $\tau = 1$ sek.

- Delprosess P_2 , som altså er raskere enn delprosess 1, er gitt ved

$$y_2(s) = H_{P2}(s)u(s) + v(s) \quad (11.3)$$

der

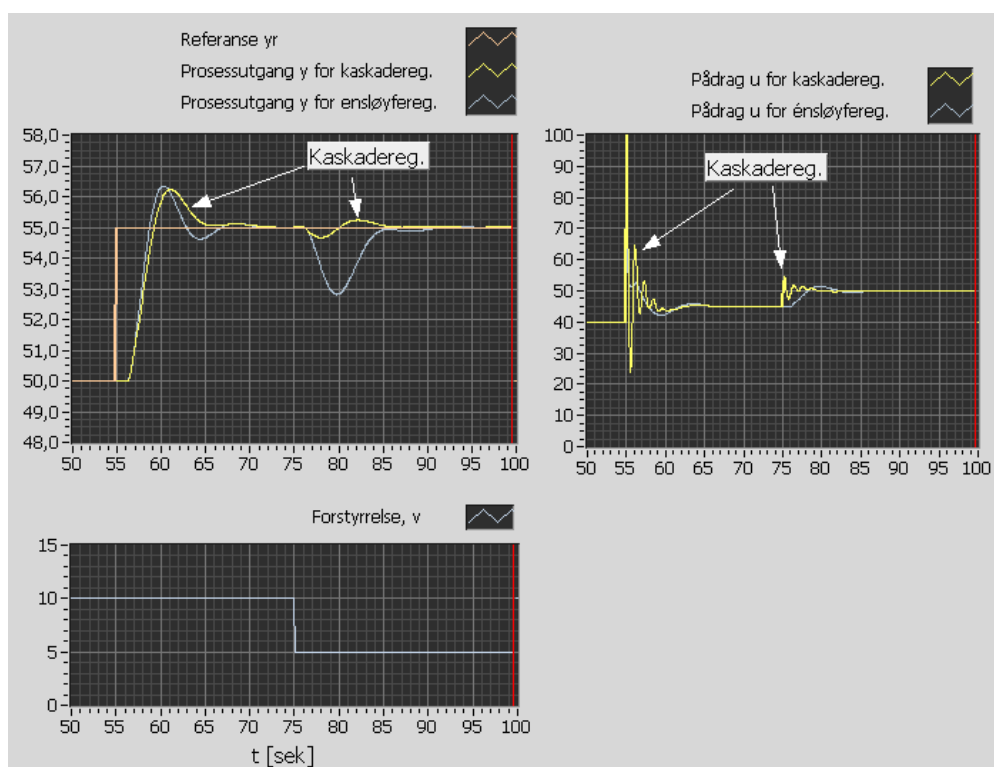
$$H_{P2}(s) = \frac{K}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta\frac{s}{\omega_0} + 1} e^{-\tau s} \quad (11.4)$$

med $K = 1$, $\omega_0 = 2$ rad/s, $\zeta = 1$ og $\tau = 0,1$ sek.

Litt grovt sagt er prosessdel P_2 da 10 ganger så rask som prosessdel P_1 . Regulatorne er innstilt med Ziegler-Nichols' lukket-sløyfe-metode. Parametrene for regulatorne i kaskadereguleringssystemet er: For regulator R_1 : $K_p = 2,12$, $T_i = 4,0$, $T_d = 1,0$. R_2 (PI-regulator): $K_p = 1,53$, $T_i = 0,69$, $T_d = 0$. Parametrene for regulatoren i énsløfereguleringssystemet er: For regulator R : $K_p = 2,10$, $T_i = 4,0$, $T_d = 1,0$.

Figur 11.2 viser simulerte responser etter sprang i referansen og sprang i forstyrrelsen. Simuleringene viser:

- Forstyrrelsens virkning på prosessutgangen er langt mindre i kaskadereguleringssystemet, takket være den hurtige sekundærsløyfen.
- Det er liten forskjell i følgeegenskapene mellom de to reguleringssløyfene. Primærregulatoren ser altså en prosess, bestående av sekundærsløyfen i serie med prosessdel P_1 , som har nesten samme dynamiske egenskaper som P_2 i serie med P_1 .
- Pådraget i kaskadereguleringssystemet virker mye mer aggressivt enn i énsløfereguleringssystemet, takket være den hurtige sekundærsløyfen. Det aggressive pådraget forbedrer forstyrrelseskompenseringen, men ikke referansefølgingen.



Figur 11.2: Eksempel 47: Simulerte responser etter sprang i referansen og forstyrrelsen for kaskadereguleringssystem og énsløyferereguleringssystem.

[Slutt på eksempel 47]

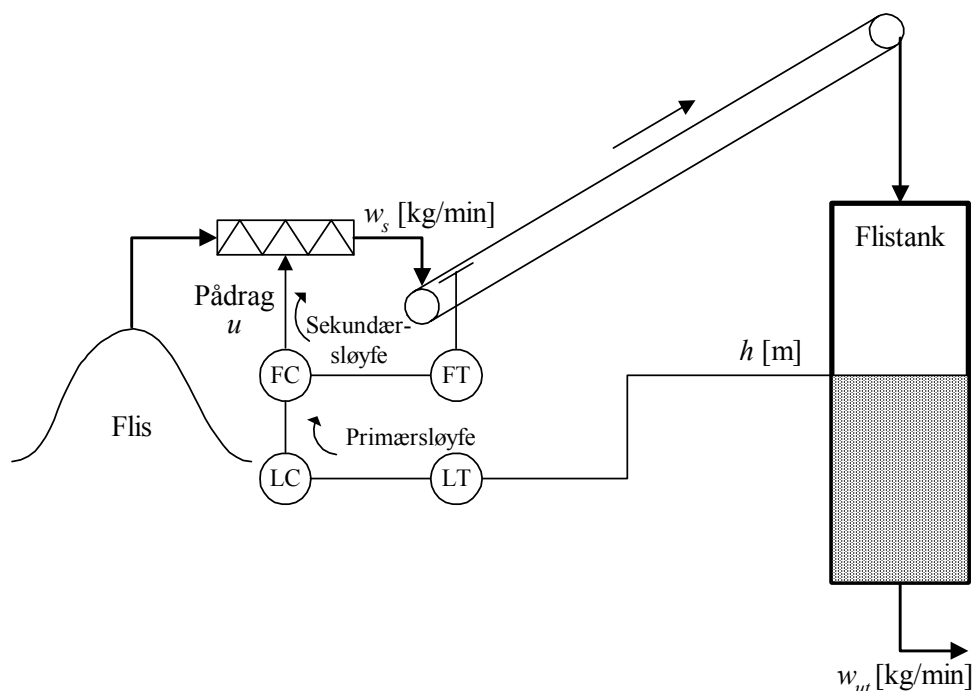
Kaskaderegulering er mye brukt i industrien. La oss se på noen eksempler.

Eksempel 48 *Kaskaderegulering av nivået i flistanken*

Nivåregulering av flistanken har vært et gjennomgående eksempel i denne boken. I det virkelige nivåreguleringssystemet² er det benyttet kaskaderegulering, selv om dette ikke har vært med i eksemplene foran i boken. Primærsløyfen er selvsagt nivåreguleringssløyfen, og i tillegg er det en sekundærsløyfe som utfører massestrømsregulering av innmatningen av flis på transportbåndet, se figur 11.3. Hensikten med sekundærsløyfen er først og fremst å gi en hurtig kompensering for forstyrrelser i flisstrømmen som skyldes bl.a. variasjon i fliskonsistensen (det veksles mellom gran, furu

²på Södra Cell Tofte

og eukalyptus) og fukt. Det blir en tilnærmet lineær sammenheng mellom pådraget u og massestrømmen w_s inn på båndet (ved målepunktet).



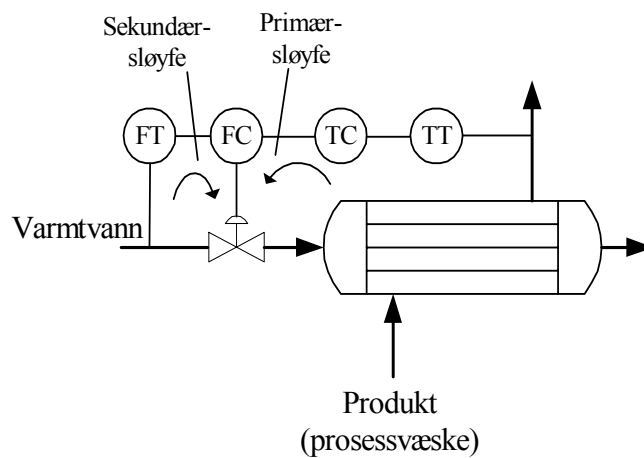
Figur 11.3: Eksempel 48: Nivåreguleringssystemet for flistanen er et kaskadereguleringssystem der primærsløyfen utfører nivåregulering og sekundærsløyfen utfører massestrømsregulering av flisinnstrømmingen. FT = Flow Transmitter. FC = Flow Controller. LT = Level Transmitter. LC = Level Controller.

[Slutt på eksempel 48]

Eksempel 49 Kaskaderegulering av varmeveksler

Figur 11.4 viser et temperaturreguleringssystem for en varmeveksler. Pådraget styrer varmtvannsventilens åpning. Primærsløyfen regulerer temperaturen i produktet. Sekundærsløyfen regulerer væskestrømmen ved å kompensere for forstyrrelser i form av f.eks. variasjoner i drivtrykk eller mottrykk, slik at tilført væskestrøm – og dermed effekt – blir tilnærmet proporsjonalt med pådraget.

[Slutt på eksempel 49]



Figur 11.4: Eksempel 49: Kaskaderegulering av produkttemperaturen i en varmeveksler. TC = Temperature Controller. TT = Temperature Transmitter. FC = Flow Controller. FT = Flow Transmitter.

Det er mange andre eksempler på bruk av kaskaderegulering. Her er en kort beskrivelse av noen:

- **Likestrømsmotor:**

- Primærsløyfen: Turtallsregulering basert på måling av turtallet med tachometer.
- Sekundærsløyfen: Regulering av ankerstrømmen i motoren, hvilket kompenserer for ulineariteter i motoren, hvilket igjen gir en mer lineær turtallsregulering.

- **Hydraulisk motor:**

- Primærsløyfen: Posisjonsregulering av arbeidssylinderen
- Sekundærsløyfen: Regulering av servoventilposisjonen (som styrer oljestrømmen til arbeidssylinderen), hvilket gir en lineær ventilbevegelse, hvilket igjen gir en mer presis styring av arbeidssylinderen.

- **Reguleringsventil:**

- Primærsløyfen: Strømningsregulering av væsken eller gassen gjennom ventilen.

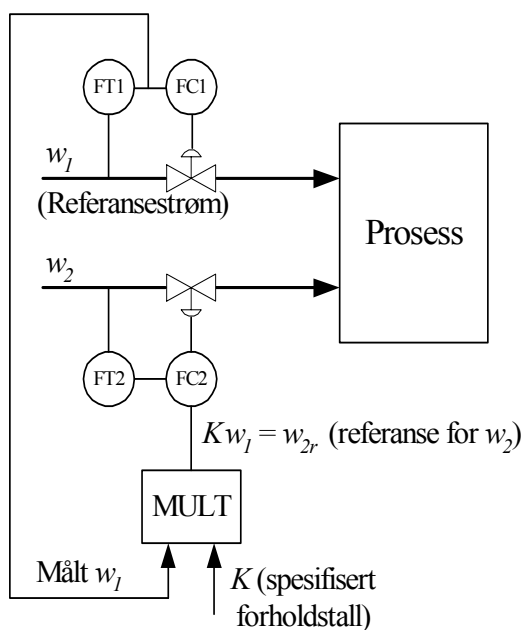
- Sekundærsløyfen: Posisjonsregulering av ventilstangen, hvilket gir en lineær ventilbevegelse³, hvilket igjen gir mer presis strømningsregulering. Et slikt internt posisjonsreguleringsystem kalles positioner (eng.).

11.2 Forholdsregulering

Forholdsregulering (eng.: ratio control) har som mål å regulere en massestrøm, w_2 , slik at forholdstallet mellom strømmen og en gitt annen strøm, w_1 , blir som spesifisert:

$$w_2 = Kw_1 \quad (11.5)$$

der K er et spesifisert (referanse-) forholdstall, som kan være funnet fra en analyse av hvilket forholdstall som gir optimale driftsbetingelser. For



Figur 11.5: Forholdsregulering

eksempel må det være et bestemt forhold mellom innstrømmingen av olje og innstrømmingen av luft i en oljebrenner for en dampkjel for at forbrenningen skal foregå optimalt (mest mulig effektivt), og i en

³Men en oppnår ikke lineær sammenheng mellom styresignal og strøm av den grunn – det er det strømningsreguleringen som sørger for.