

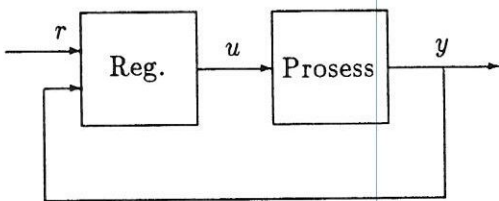
Kapittel 12

Kaskaderegulering

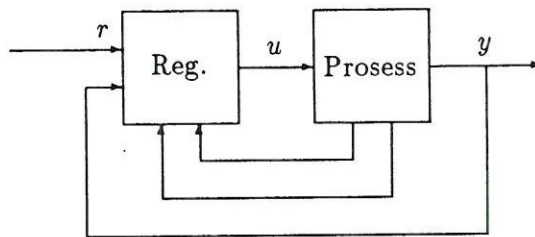
12.1 Innledning

Perspektiv. Ved kaskaderegulering er det flere reguleringssystemer inni hverandre—i *kaskade*. Hensikten med kaskaderegulering er å oppnå et reguleringssystem med *bedre følge- og reguleringssegenskaper enn med bruk av vanlig seriekompensasjon*. Figur 12.1 gir en (forenklet) sammenlikning av kaskaderegulering og seriekompensering (det vil være målelementer i tilbakekoplingene, men de er ikke vist). Ved seriekompensasjon er det tilbakekopling bare fra prosessutgangen, mens det ved kaskaderegulering er tilbakekopling fra flere prosessvariable (i tillegg til prosessutgangen). Dette

Seriekompensering:



Kaskaderegulering:



Figur 12.1: Seriekompensering og kaskaderegulering.

innebærer at regulatoren ved kaskaderegulering (regulatorene omfatter da egentlig flere interne regulatorer) benytter *mer informasjon* om prosessens tilstand, og det er et generelt prinsipp at jo mer informasjon (for eksempel i form av flere målinger) vi har om prosessen, jo bedre kan den reguleres.

I tillegg til at følge- og reguleringssegenskapene (ytelsen) kan bli bedre, vil reguleringsystemet kunne bli *mer robust* overfor endringer i prosessens (dynamiske) egenskaper. Den økte robustheten kan forklares ved at reguleringsystemet får “flere ben å stå på” enn ved vanlig seriekompensering.

Kaskaderegulering har altså viktige fordeler sammenliknet med seriekompensering, men har samtidig en ulempe: Det kreves ekstra målinger, altså ekstra måleutstyr. Men disse utgiftene kan bli raskt dekket av inntektene av forbedret regulering (bedre produktkvalitet, mindre forurensning, m.m.).

Kapitlets formål.

- Å beskrive strukturen for et kaskadereguleringssystem.
- Å vise eksempler på anvendelser av kaskaderegulering.

Opplegg. Etter en generell beskrivelse av metoden, følger flere eksempler. Ett av eksemplene er detaljert og dreier seg om bruk av kaskaderegulering for posisjonsregulering av likestrømsmotoren beskrevet i underkapittel 6.3.

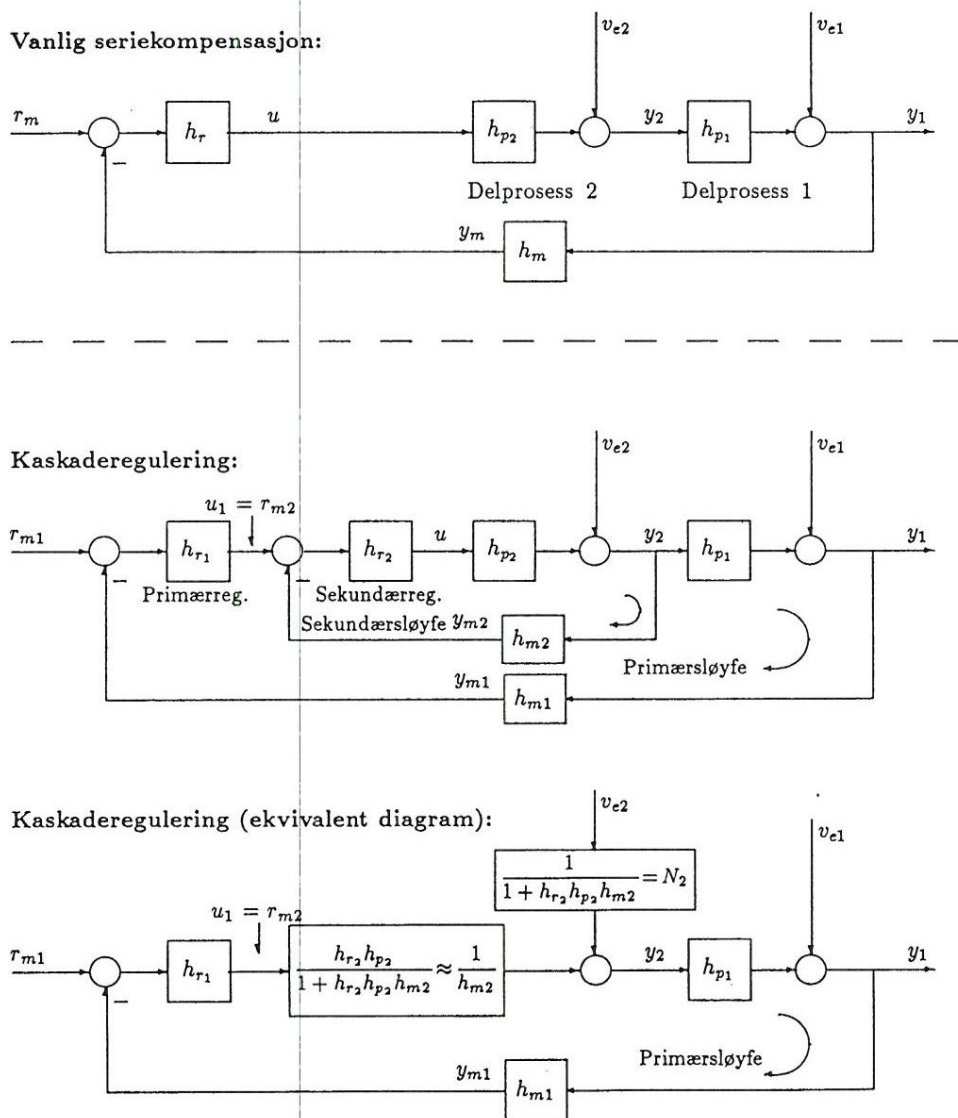
12.2 Kaskaderegulering

Vi skal se nærmere på hvorfor kaskaderegulering er effektivt og skal da ta utgangspunkt i blokkdiagrammene vist i figur 12.2. Figuren viser øverst vanlig seriekompensering, i midten kaskaderegulering og nederst et ekvivalent blokkdiagram for kaskaderegulering. (Blokkene inneholder transferfunksjoner, men for enkelhets skyld er argumentet s utelatt.) Den totale prosessen består av to delprosesser, og det virker en forstyrrelse på hver delprosess. Disse forstyrrelsene er representert ved sine ekvivalente forstyrrelser (som definert i underkapittel 8.3.1).

Det nye ved kaskaderegulering i forhold til seriekompensering er den indre reguleringsløyfen som det er vanlig å betegne *sekundærsløyfen*. Sekundærsløyfen består av tilbakekopling fra den interne prosessutgangen y_2 , via måleelementet h_{m2} , og en egen regulator, *sekundærregulatoren*, h_{r2} . Den ytre reguleringsløyfen, som er basert på tilbakekopling fra utgangen $y_1 = y$, kan i kaskadereguleringssystemet betegnes *primærsløyfen*. Den tilhørende regulatoren betegnes *primærregulatoren*. Merk at utgangen av primærregulatoren danner referansen for sekundærsløyfen. Merk også at selv om det er to målinger og to regulatorer, så er det fremdeles bare ett pådrag, u , som styrer prosessen.

Men hva er så hensikten med å innføre sekundærsløyfen? Vi legger merke til at h_{p2} og v_{e2} , som utgjør delprosess 2, er inne i sekundærsløyfen, som er et tilbakekoplet system. Fra det nederste diagrammet i figur 12.2 ser vi følgende:

1. Sekundærsløyfen reduserer virkningen av forstyrrelsen v_{e2} fordi v_{e2} nå “går igjennom” sekundærsløyfens sensitivitetsfunksjon N_2 før den innvirker på



Figur 12.2: To reguleringsstrukturer for samme prosess (som består av to delprosesser): Øverst: Vanlig seriekompensasjon. I midten: Kaskaderegulering. Nederst: Et ekvivalent diagram for kaskaderegulering. (Blokkene inneholder transferfunksjoner, men for enkelhets skyld er argumentet s utelatt.)

y_2 . Men denne reduksjonen vil bare gjelde frekvenskomponenter i forstyrrelsen opp til sekundærsløyfens båndbredde ω_{b2} , for det er bare i dette frekvensområdet at $|N_2| < 1$. Når v_{e2} har fått mindre virkning på y_2 , så har den selvsagt fått mindre virkning også på y_1 , som er den variabelen

som egentlig skal reguleres. Med sekundærsløyfen kan altså regulerings-egenskapene forbedres med hensyn på forstyrrelsen v_{e2} , men muligens også med hensyn på v_{e1} , se punkt 3 nedenfor.

Vi kan si at reguleringsegenskapene blir bedre fordi sekundærsløyfen kompenserer for forstyrrelser før de får slått igjennom på primærutgangen.

2. Sekundærsløyfen “erstatte” prosessdel 2 med den inverse av sekundærmåleelementet h_{m2} , altså $\frac{1}{h_{m2}}$. Dette gjelder for frekvensområdet opp til ω_{b2} (jfr. underkapittel 8.4). h_{m2} er vanligvis tilnærmet en konstant, K_{m2} . Den “nye” prosessdel 2 vil ofte kunne ha en mer gunstig frekvensrespons (mindre negativ fase), og derfor kan primærsløyfen kunne få høyere båndbredde enn uten sekundærsløyfen. Kaskadereguleringssystemet kan altså få bedre følgeegenskaper, eller bli “raskere”.

Merk at primærregulatoren nå kan oppfatte sekundærutgang y_2 som pådrag, riktignok med transferfunksjonen $\frac{1}{h_{m2}}$ i mellom, altså:

$$\frac{y_2(s)}{u_1(s)} \approx \frac{1}{h_{m2}(s)} \quad (12.1)$$

3. Siden båndbredden kan bli større, vil også reguleringsegenskapene med hensyn på forstyrrelsen v_{e1} kunne bli bedre.
4. Sekundærsløyfen kan redusere virkningen av eventuelle parametervariasjoner i prosessdel 2, jfr. underkapittel 8.5. Dermed kan vi si at komponenter i prosessdel 2 med parametervariasjoner (for eksempel på grunn av slitasje eller en ulineær (ventil)karakteristikk) er “erstattet” av en ny prosessdel med mer lineære egenskaper.

For å oppsummere:

Hva kan oppnås med kaskaderegulering:

- Bedre reguleringsegenskaper (fordi sekundærsløyfen kompenserer for forstyrrelser før de får slått i gjennom på primærutgangen).
- Bedre følgeegenskaper (fordi prosessdel 2 blir erstattet av den inverse av sekundærmåleelementets transferfunksjon (som oftest er en konstant)).
- Bedre robusthet overfor parametervariasjoner (begrunnelsen fra punktet ovenfor kan brukes også her).

Ved innstilling av regulatorene tas sekundærregulatoren først. Primærsløyfen skal være åpen, hvilket i praksis betyr at primærregulatoren skal stå i manuell. Når sekundærregulatoren er innstilt, innstilles primærregulatoren. For begge regulatorene kan Ziegler-Nichols' metoder eller auto-tuning eller frekvensresponsdesign brukes.

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 vanligvis kan gi fordi prosessdel 2 uansett oftest vil ha mye raskere dynamikk enn prosessdel 1. Dessuten er det alltid bra å slippe eventuell forsterkning av høyfrekvent målestøy (gjennom derivatleddet).

Kaskaderegulering er mye brukt. Vi skal nå se på noen eksempler.

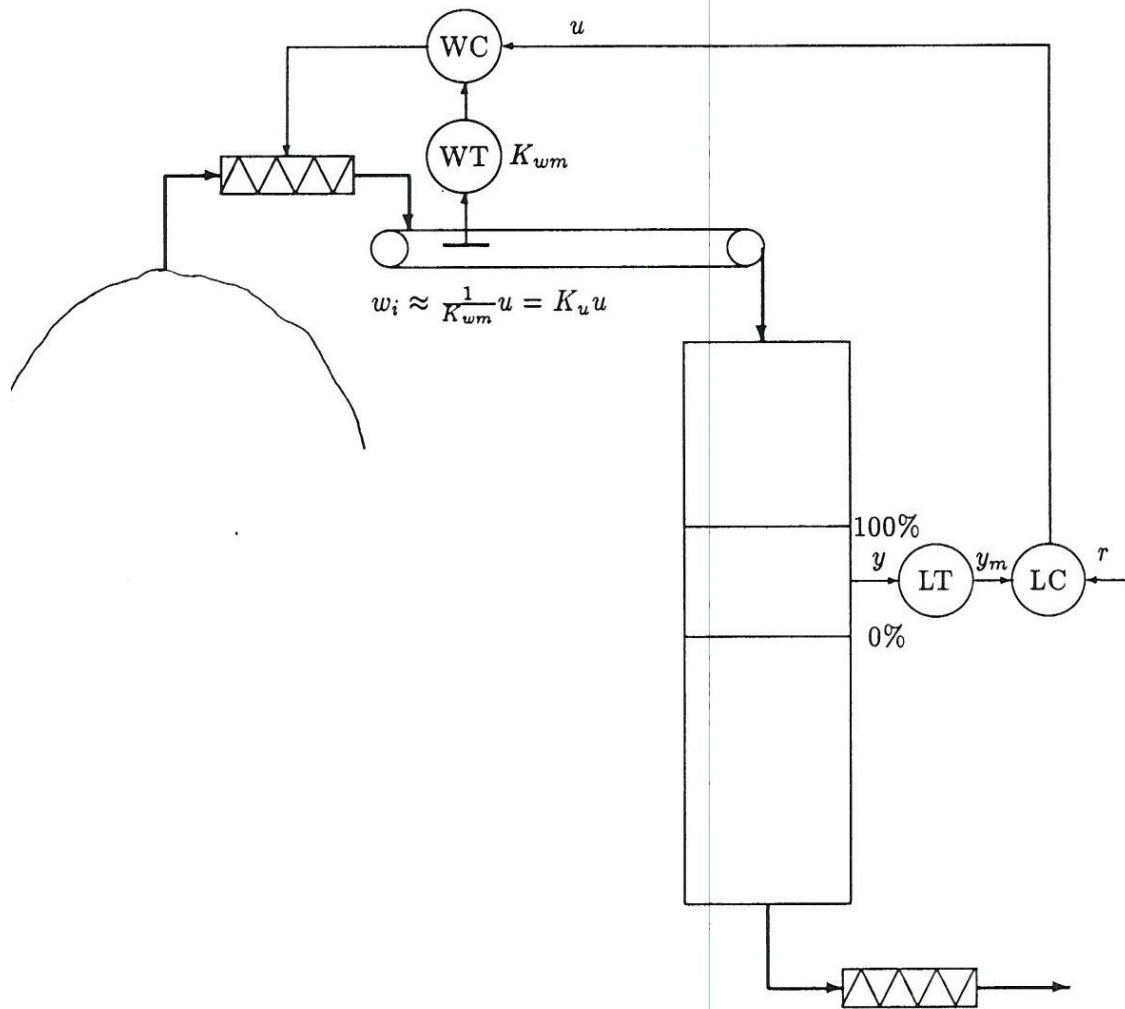
Eksempel 12.1 Kaskaderegulering av nivået i flistanken

Nivåregulering av flistanken har vært et gjennomgående eksempel i denne boken. I det virkelige nivåreguleringssystemet¹ er det benyttet kaskaderegulering, selv om jeg ikke har tatt det med i eksemplene foran i boken. Primærsløyfen er selvsagt nivåreguleringssløyfen. Men i tillegg er det en sekundærsløyfe som utfører massestrømsregulering av innmatningen av flis på transportbåndet, se figur 12.3. Hensikten med sekundærsløyfen er blant annet å sørge for en presis innmatning i den forstand at innmatet mengde pr. tid blir mest mulig proporsjonal med pådraget fra primærregulatoren. Hvis vi antar at massestrømsmåleren WT har måleforsterkning K_{wm} , blir transferfunksjonen fra styresignalet u til innmatet massestrøm w_i (ihvertfall opp til sekundærsløyfens båndbredde) tilnærmet

$$\frac{w_i(s)}{u(s)} \approx \frac{1}{K_{wm}} = K_u \quad (12.2)$$

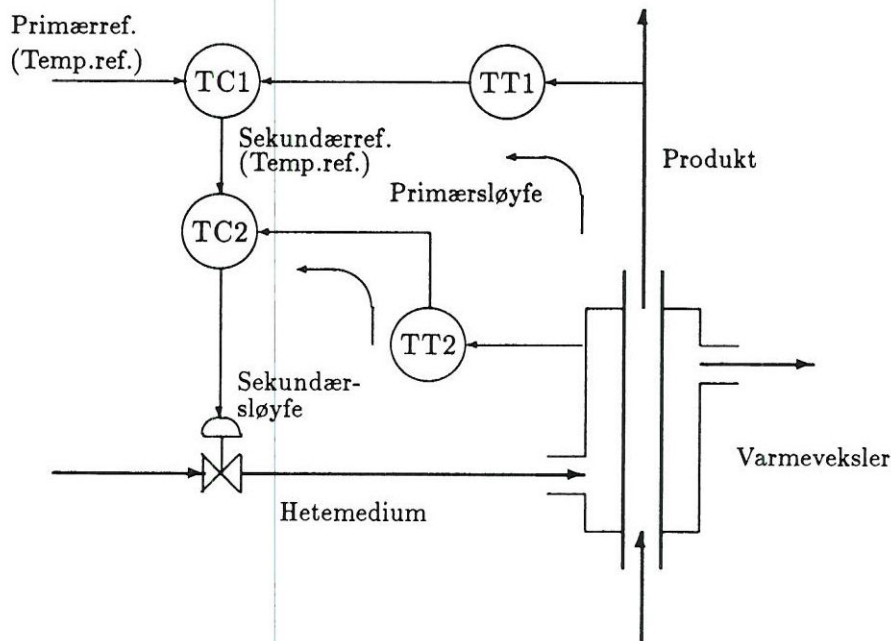
som er $K_u = 33,36 \text{ (kg/min)/\%}$ oppgitt i underkapittel 1.3.

Sekundærsløyfen sørger også for rask kompensering av forstyrrelser som variabel fliskonsistens. Hvis det var bare nivåregulatoren (primærregulatoren) som skulle gi denne kompenseringen, ville den ha skjedd langt tregere fordi båndbredden nivåreguleringssløyfen vil være mindre enn båndbredden i massestrømsreguleringssløyfen (i den førstnevnte sløyfen inngår jo (hele) transportbåndet med sin tidsforsinkelse).

Eksempel 12.2 Kaskaderegulering av varmeveksler¹på Norske Skogs fabrikker, Tofte

Figur 12.3: Nivåreguleringssystemet for flistanken. Sekundærsøyfen utfører massestrømsregulering av innmatningen av flis på transportbåndet.

Hensikten med en varmeveksler er å gi det strømmende produktet en spesifisert temperatur. Effektilførselen (eventuelt fjerning av effekt hvis det er kjøling som er hensikten) skjer via varmeovergang mellom hetemediet (eventuelt kjølemediet) og produktet. Denne oppgaven løses ved hjelp av et temperaturreguleringssystem. Pådraget er styresignalet til en ventil som justerer tilstrømningen av hetemediet (væske eller damp). Vi skal i det etterfølgende anta at hetemediet er væske. Figur 12.4 viser et temperaturreguleringssystem basert på kaskaderegulering. Systemets virkemåte beskrives nedenfor.



Figur 12.4: Kaskaderegulering av temperaturen av en varmeveksler. Sekundærsløyfen utfører temperaturregulering av hetemediet.

Sekundærsløyfen utfører temperaturregulering av hetemediet. Sekundærsløyfen vil kompensere for forstyrrelser som variasjon i drivtrykket for hetemediet og temperaturvariasjoner i innstrømmende hetemedium. Dermed vil sekundærsløyfen gi mest mulig jevn temperatur i hetemediet slik at effekttilførselen til produktet blir mest mulig jevn.

Med en “rask” sekundærsløyfe vil transferfunksjonen fra pådraget fra primærregulatoren til hetemediets temperatur være tilnærmet

$$\frac{T_h(s)}{u(s)} \approx \frac{1}{K_{tm}} \quad (12.3)$$

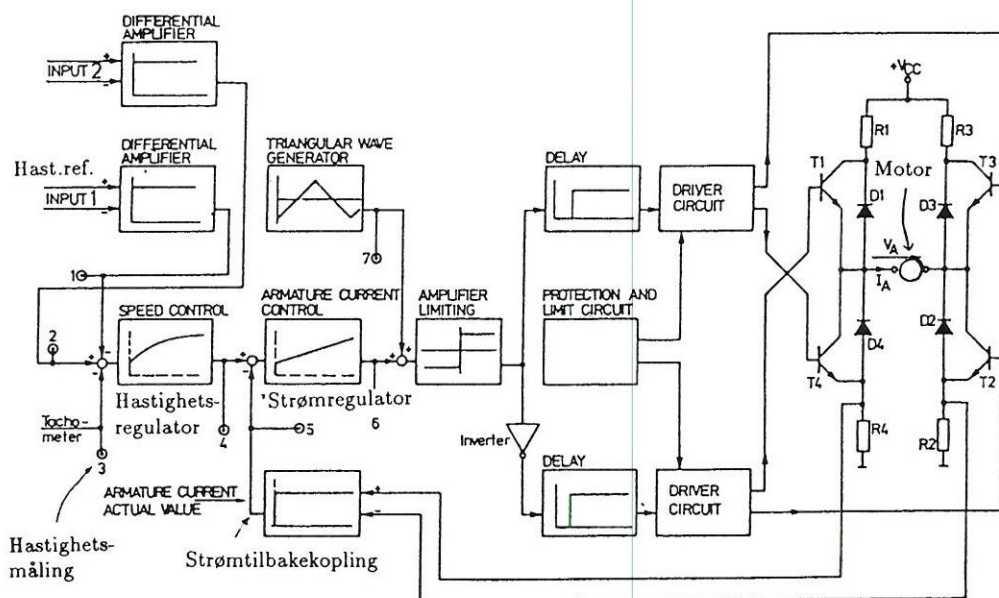
der K_{tm} er måleforsterkningen for hetemediets temperaturmåler. På denne måten blir hetemediets temperatur et slags pådrag sett fra primærregulatoren.

Hvis det er ønskelig å oppnå en spesielt jevn strømming av hetemediet, kan man bruke en strømningsreguleringssløyfe rundt ventilen. denne sløyfen vil da utgjøre en “tertiærsløyfe”.

Eksempel 12.3 Kaskaderegulering i hastighetsservomekanisme

Med servomekanisme menes motor med posisjons- eller hastighetsregulerings-system.

Likestrømsmotorer må ha elektroniske driverkretser som sørger for effekt-tilførselen til motoren. I driverkretsene er ofte reguleringsfunksjoner også implementert. Figur 12.5 viser et skjema for et kommersielt driversystem for en likestrømsmotor som skal gå som en hastighetsservo, det vil si at motorens vinkelhastighet eller turtall skal reguleres (følge en hastighetsreferanse). I figuren kan vi se hastighetsregulatoren, hvis innganger er referansen



Figur 12.5: Kommerielt driversystem for likestrømsmotor. (TSNM, Baldor)

og hastighetsmålingen som kommer fra et tachometer.² Hastighetssløyfen utgjør primærsløyfen. Dessuten er det tilbakekopling fra ankerstrømmen (som er den drivende "kraft" på motoren). Denne strømtilbakekoplingen går til strømregulatoren og dette utgjør sekundærsløyfen i hastighetsregulerings-systemet. Hensikten med strømtilbakekoplingen er blant annet å kompensere for ulineariteter i selve driverkretsen slik at det blir en jevnere ankerstrøm. (Den viste driverkretsen er skreddersydd for hastighetsregulering. Den kan imidlertid godt brukes også ved posisjonsregulering, men da trengs en ekstern posisjonsreg-

²Et tachometer er i prinsippet en omvendt motor; Den genererer en spenning som er proporsjonal med rotasjonshastigheten.

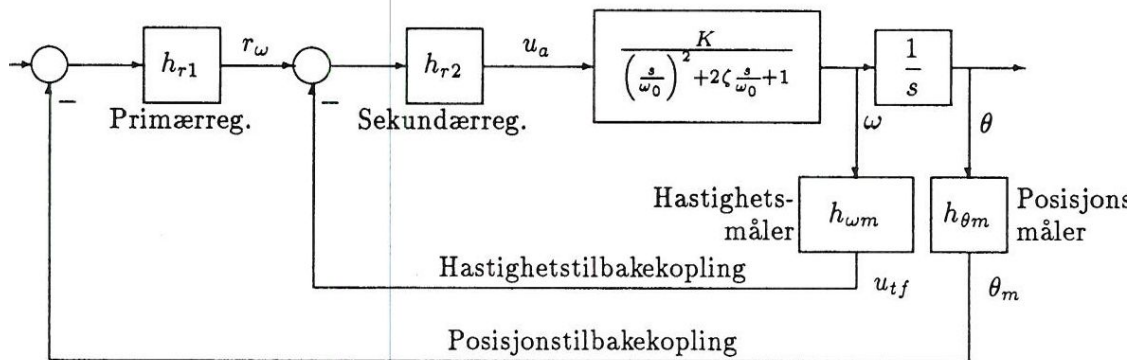
ulator.)

Når det gjelder selve regulatorfunksjonene som er implementert i denne driveren, så er de representert med de respektive regulatorenes sprangrespons, slik det gjøres blant enkelte utstyrsleverandører. Hastighetsregulatoren er en begrenset PI-regulator, mens strømregulatoren er en (ideell) PI-regulator.

Eksempel 12.4 Kaskaderegulering i en posisjonsservomekanisme

Vi skal prøve kaskaderegulering av likstrømsmotoren som ble presentert i eksempel 6.6 og 6.7. Vi skal sammenlikne såvel følgeegenskapene som reguleringsegenskapene ved bruk av kaskaderegulering og vanlig seriekompensering. Følgeegenskapene gjelder reguleringsystemets evne til å følge referansen, mens reguleringsegenskapene gjelder dets evne til å kompensere for virkningene av lastmomentet, T_L .

Figur 12.6 viser et matematisk blokkdiagram for posisjonsreguleringssystemet. Posisjonsreguleringssløyfen utgjør primærsløyfen, mens sekundærsløyfen er i form av hastighetsreguleringssløyfe. Lastmomentet T_L , som er en forstyrrelse, befinner seg inni hastighetsreguleringssløyfen. T_L er imidlertid ikke inntegnet i blokkdiagrammet, se i stedet blokkdiagrammet i figur 6.19.



Figur 12.6: Posisjonsreguleringssystemet basert på kaskaderegulering der sekundærsløyfen er en hastighetsreguleringssløyfe.

I figur 12.6 er $h_{\omega m}$ transferfunksjonen fra hastighet til målt hastighet, som er tachometerets utgangsspenning:

$$\frac{u_{tf}(s)}{\omega(s)} = h_{\omega m}(s) = \frac{K_{\omega}}{T_f s + 1} \quad (12.4)$$

der

$$K_{\omega} = 14 \text{ V/krpm} = 0,134 \text{ V/(rad/s)} \quad (12.5)$$

og

$$T_f = 1,57 \text{ ms} \quad (12.6)$$

Videre er $h_{\theta m}$ posisjonsmålerens transferfunksjon (fra posisjon til målt posisjon). Vi antar at denne bare er en konstant, gitt ved

$$\frac{\theta_m(s)}{\theta(s)} = h_{\theta m}(s) = K_{\theta} = 1 \text{ V/rad} \quad (12.7)$$

Motorens transferfunksjon, fra klemmespenning u_a til hastighet ω er gitt ved (jfr. eksemplene 6.6 og 6.8)

$$\frac{\omega(s)}{u_a(s)} = h(s) = \frac{K}{\left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2 + 2\zeta \frac{s}{\omega_0} + 1} \quad (12.8)$$

der

$$K = \frac{K_T}{K_T K_e + B R_a} = 7,68 (\text{rad/s})/\text{V} \quad (12.9)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_T K_e + B R_a}{J L_a}} = 113 \text{ rad/s} \quad (12.10)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \cdot \frac{J R_a + B L_a}{\sqrt{J L_a (K_T K_e + B R_a)}} = 1,73 \quad (12.11)$$

Treghetsmomentet J ovenfor er det totale treghetsmomentet for motor med last, og det er antatt å være $J = 8J_m$ der J_m er treghetsmomentet for motoren selv.

Transferfunksjonen fra hastighet til posisjon er gitt ved

$$\frac{\theta(s)}{\omega(s)} = \frac{1}{s} \quad (12.12)$$

som er en integrator.

Hvilke regulatortyper skal vi velge for primærregulatoren (posisjonsregulatoren) h_{r1} og sekundærregulatoren (hastighetsregulatoren) h_{r2} ? Vi regner med at sekundærsøyfen sikrer tilfredsstillende reguleringssegenskaper. Det trengs da ikke noen integralvirkning i h_{r1} for å sikre reguleringssegenskapene. Når det gjelder følgeegenskapene, vil en regulator uten integralvirkning gi null sprangavvik og et endelig rampeavvik fordi systemtypen blir 1 (det er en integrator fra hastighet til posisjon). La oss godta dette. Det står da mellom en P- og en PD-regulator for primærregulatoren. Skal vi bruke derivatvirkning? Nei, det er unødvendig når vi

har hastighetstilbakekopling. Det ligger nemlig derivatvirkning i selve hastighetstilbakekoplingen fordi hastigheten er den deriverte av posisjonen. Vi velger altså en P-regulator som primærregulator:

$$h_{r1}(s) = K_p \quad (12.13)$$

Hva med sekundærregulatoren? Her bruker vi en PI-regulator. Dermed blir virkningen av et konstant lastmoment lik null. Altså:

$$h_{r2}(s) = K_p \frac{1 + T_i s}{T_i s} \quad (12.14)$$

Jeg har valgt å bruke en P-regulator i seriekompenseringen.

Hvordan skal regulatorparametrene beregnes? Vi ser først på sekundærregulatoren. Dynamikken i hastighetssløyfen er dominert av den mekaniske tidskonstanten T_M , jfr. underkapittel 6.3.3. Transferfunksjonen for prosessen (prosessdel 2 med måleelement, jfr. figur 12.2) er

$$\frac{u_{tf}(s)}{u_a(s)} = \frac{K_1}{T_M s + 1} \quad (12.15)$$

der

$$T_M = 0,031 \quad (12.16)$$

og

$$K_1 = \frac{1}{K_e} = 7,7 \quad (12.17)$$

Jeg velger å beregne PI-regulatorens parametre ved hjelp av transferfunksjonsmetoden, jfr. kapittel 10. (10.65) og (10.66) gir formler for K_p og T_i når ζ og ω_0 for det lukkede system er spesifisert. Jeg spesifiserer en god dempning for hastighetssløyfen: $\zeta = 2$ (husk på at dempningen i sprangresponsen blir mindre enn hva ζ i seg selv uttrykker fordi det lukkede system får et nullpunkt, se (10.63)). Dessuten sier jeg at hastighetssløyfen skal være 5 ganger så rask som selve motoren, altså:

$$\omega_0 = 5 \cdot \frac{1}{T_M} = 162 \text{ rad/s} \quad (12.18)$$

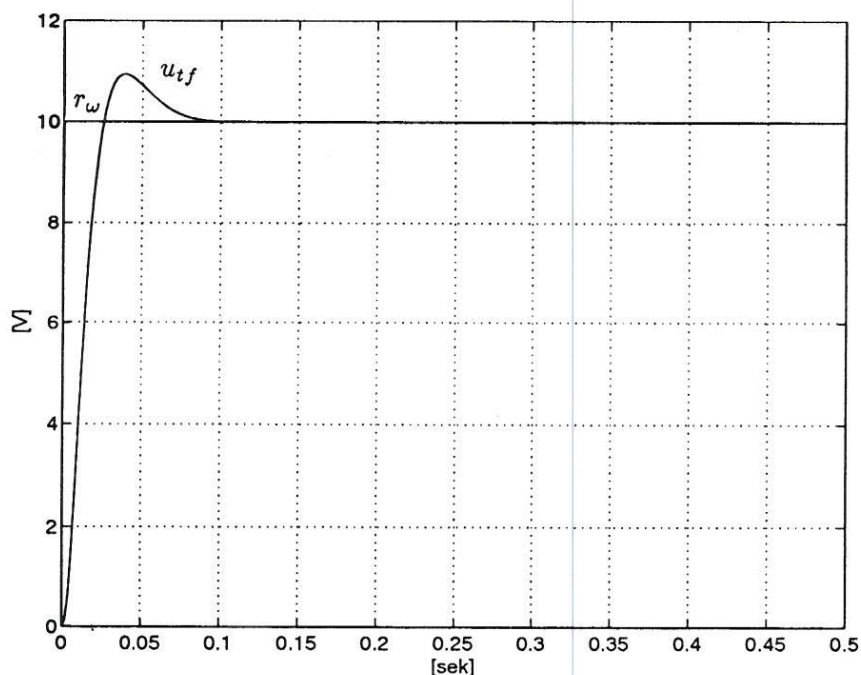
Formel (10.65) gir nå

$$K_p = \frac{2\zeta\omega_0 T_M}{K_1} = 1,95 \quad (12.19)$$

og formel (10.66) gir

$$T_i = \frac{K_p K_1}{\omega_0^2 T_M} = 0,0185 \text{ sek.} \quad (12.20)$$

La oss se på sekundærsløyfens respons før vi tar for oss primærregulatoren (bare for å forsikre oss om at sekundærsløyfen i seg selv virker tilfredsstillende). Figur



Figur 12.7: Sjekking av design av sekundærsøyfen: Responsen i hastighetsmålingen u_{tf} etter et sprang i hastighetsreferansen.

12.7 viser responsen i hastighetsmålingen u_{tf} etter et sprang på 10 volt i hastighetsreferansen. Responsen ser brukbar ut.

Nå da sekundærregulatoren har fått brukbare parametre, skal vi finne K_p i primærregulatoren (med sekundærsøyfen oppkoplet). Jeg brukte relé-basert auto-tuning på primærregulatoren (auto-tuneren er beskrevet i underkapittel 7.4). Resultatet ble $K_{pk} = 28,16$ og $T_k = 0,046$ sek. (men vi trenger ikke T_k for P-regulatoren). K_p er nå gitt ved

$$K_p = 0,5K_{pk} = 14,08 \quad (12.21)$$

Men responsen med denne K_p ble noe oscillatorisk, så jeg reduserte den til det halve:

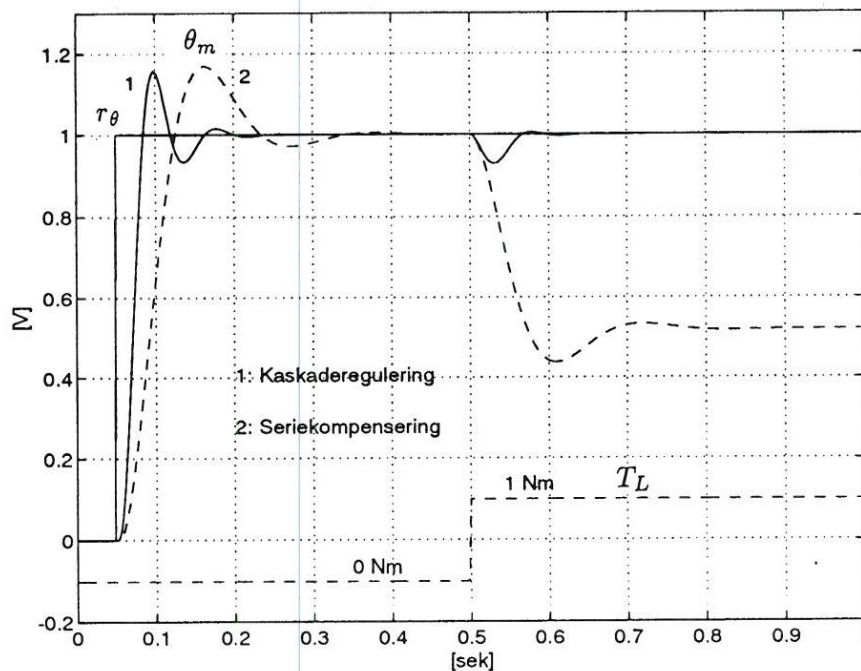
$$K_p = 7,04 \quad (12.22)$$

Nå gjenstår det å finne K_p for P-regulatoren i seriekompensatoren som vi skal bruke når vi sammenlikner kaskaderreguleringen med seriekompenseringen. Jeg brukte auto-tuning for å finne en rimelig startverdi for K_p , som jeg så etterjusterte på simulatoren inntil responsen ble brukbar (auto-tuneren ga for dårlig demping, hvilket er typisk når den brukes på servosystemer). Jeg kom fram til at

$$K_p = 4,0 \quad (12.23)$$

ga en brukbar respons.

Nå til sammenlikningen av de to reguleringsmetodene. Spranget i T_L er på 1 Nm og kommer ved $t = 0,05$ sek. Figur 12.8 viser responsene etter et sprang i referansen r og etter et sprang i lastmomentet T_L (forstyrrelsen) for de to reguleringsystemene. Vi ser at kaskadereguleringssystemet gir best følge- og



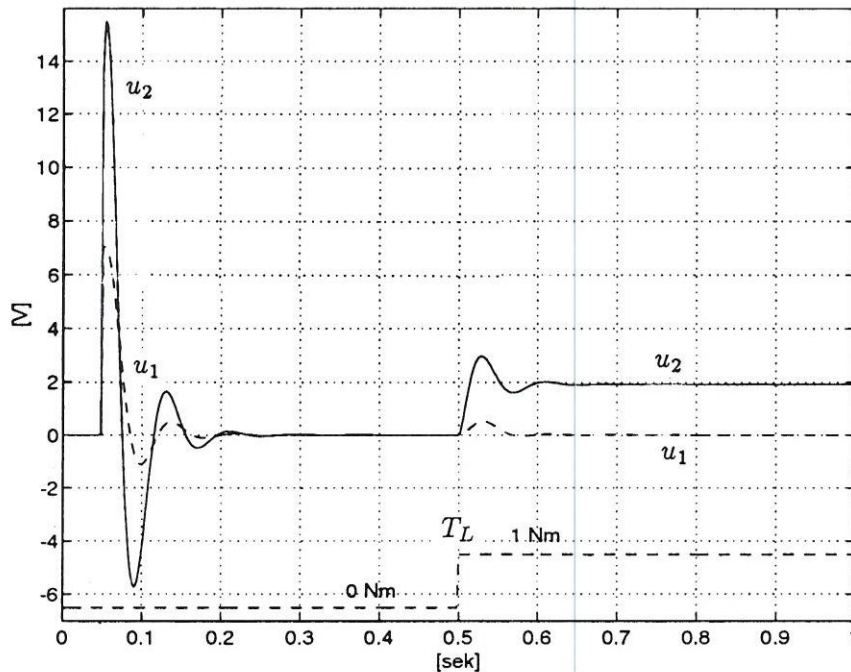
Figur 12.8: Responser i posisjonsmålingen θ_m etter sprang i referansen og sprang i lastmomentet T_L .

reguleringsegenskaper.

Figur 12.9 viser hvordan pådragene fra primærregulatoren og fra sekundærregulatoren (begge i kaskadereguleringssystemet) "jobber". Vi ser at det er det sistnevnte som jobber "hardest" og gir den mest effektive kompenseringen ved endringer av referansen og forstyrrelsen.

Eksempel 12.5 Kaskaderegulering i en hydraulisk servomekanisme

God bruk av reguleringsteknikk er innbakt i mange kommersielle produkter. Eksempel 12.3 viste kaskaderegulering implementert i driversystemet for en



Figur 12.9: Pådraget ut fra primærregulatoren, u_1 , og ut fra sekundærregulatoren, u_2 i kaskadereguleringssystemet etter et sprang i referansen og et sprang i lastmomentet T_L .

likestrømsmotor. Et annet eksempel er hydrauliske servomekanismer. I noen systemer er det lagt opp til interne tilbakekoplinger fra hastighet, lasttrykk (differensialtrykket over arbeidsstempelet) og servoventilens posisjon. Figur 1.22 i kapittel 1 viser et slikt kaskadereguleringssystem. I figuren ser vi at det er lagt opp til kaskaderegulering med opp til 4 sløyfer. Dette er en utmerket reguleringsstruktur. Med denne reguleringsstrukturen kan servomekanismen få meget høy ytelse (høy båndbredde). Spesielt vil jeg nevne at trykktilbakekoplingen reduserer den hydrauliske resonansen (som skyldes at oljen er kompressibel). (Se (6.121 i kapittel 6. Trykktilbakekoplingen har samme dynamiske effekt som en økning av K_I .) Denne resonansen er ellers begrensende med hensyn til den båndbredden som kan oppnås for posisjonsreguleringssystemet.

12.3 Sammendrag

Kaskaderegulering innebærer at det inne i (hoved)reguleringssløyfen eller primærsløyfen lages én eller flere nye indre reguleringssløyfer. Det skal være én regulator og én måling for hver sløyfe. Kaskaderegulering kan gi en spesielt kraftig reduksjon av virkningene av forstyrrelser ved at de indre sløyfene tar seg av dem før de får virkning på primærsløyfen. Kaskaderegulering kan også gi bedre robusthet overfor prosessvariasjoner og motvirke virkningene av ulineariteter som befinner seg i de indre sløyfene. Man beregner regulatorparametrene for regulatoren i den innerste sløyfen først. Så arbeider man seg utover. Ytre sløyfer skal da stå i manuell (være åpne).