

Kapittel 10

Foroverkopling

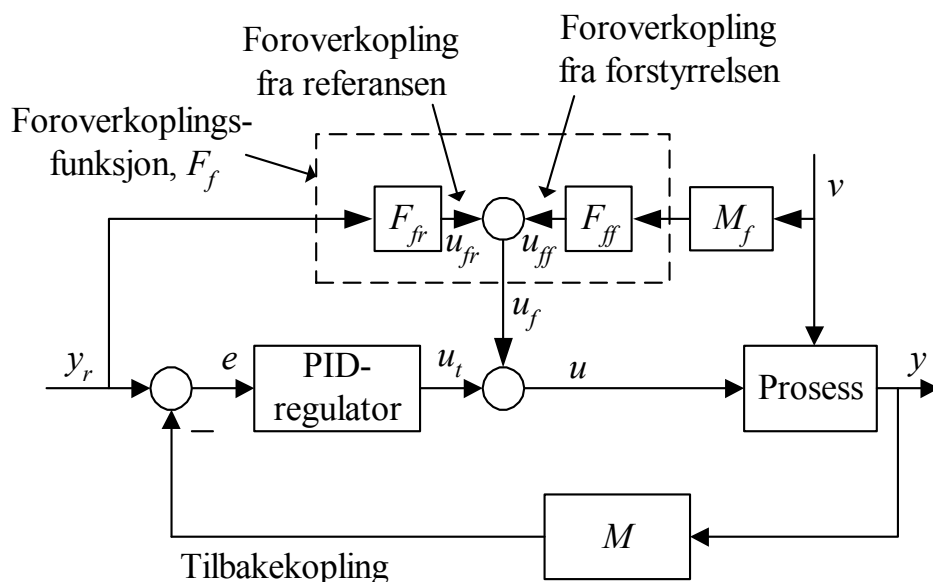
10.1 Innledning

Vi vet fra tidligere kapitler at tilbakekoplet regulering vil kunne bringe prosessutgangen tilstrekkelig nær referansen. I de fleste tilfeller er dette en tilstrekkelig god reguleringsmetode. Et problem med tilbakekopling er imidlertid at det ikke kan skje noen justering av pådraget før avviket er blitt forskjellig fra null, siden pådraget jo justeres som funksjon av avviket. Et annet problem er at prosessutgangen må måles. Disse to problemene eksisterer ikke ved *foroverkopling* (eng.: feedforward control), som kan være et alternativ, eller helst et supplement, til tilbakekoplet regulering.

Ved foroverkopling er det *kopling fra referansen og/eller fra forstyrrelsen direkte til pådraget*, dvs. at det er kopling fra reguleringsystemets inngangssignaler til pådraget. Denne pådragsjusteringen er ikke avviksbasert. Den er i stedet basert på kjennskap til prosessens egenskaper i form av en matematisk modell. Perfekt foroverkopling gir null reguleringsavvik for *alle typer signaler* (f.eks. sinussignaler og rampesignaler) i referansen og forstyrrelsen. Dette høres besnærende ut, men foroverkopling kan være *kreven* å implementere siden den forutsetter (bygger på) en matematisk modell av prosessen og at alle variable i modellen har kjente verdier gjennom måling eller på annen måte. Disse forutsetningene er aldri oppfylt fullt ut, så det vil i praksis bli et reguleringsavvik forskjellig fra null ved bruk av foroverkopling. Vi kan imidlertid regne med at avviket blir mindre med en imperfekt foroverkopling enn uten foroverkopling i det hele tatt.

Figur 10.1 viser strukturen av et reguleringsystem med foroverkopling, i

tillegg til tilbakekopling. Hensikten med tilbakekoplingen er å kompensere



Figur 10.1: Reguleringsystem med både foroverkopling (fra referansen og forstyrrelsen) og tilbakekopling. F_{y_r} og F_v er foroverkopplere.

for at foroverkoplingen i praksis ikke kan beregne perfekt pådrag, hvilket skyldes modellfeil og unøyaktige målinger. Med tilbakekopling blir avviket mindre enn med bruk av en imperfekt foroverkopling alene. Dersom regulatoren i tilbakekoplingen har integralvirkning, blir det statiske reguleringsavviket null.

En måte å betrakte foroverkopling fra forstyrrelsen på, er at foroverkoplingen introduserer en kunstig kopling som skal motvirke den naturlige (og unngåelige) koplingen fra forstyrrelsen til prosessutgangen.

Foroverkopplingsfunksjonen F_f , som vanligvis består av en sum av delfunksjonene F_{f_r} og F_{f_f} som angitt i figur 10.1, kan utvikles fra en differensialkningsmodell eller en transferfunksjonsmodell av prosessen. Begge måtene beskrives i de følgende underkapitlene. Prinsippet er i begge tilfeller å løse mht. pådraget (u) i prosessmodellen med referansen (y_r) innsatt for prosessutgangen (y). Dette pådraget er da pådragsbidraget u_f til det totale pådraget u , jf. figur 10.1.

Foroverkopplingsfunksjonen F_f utgjør et dynamisk nominelt pådrag på prosessen, dvs. at $u_f(t) = u_0(t)$, jf. f.eks. figur 2.10.

Bruk av foroverkopling sammen med tilbakekopling påvirker ikke den tilbakekoplete sløyfens stabilitet siden foroverkoplingen ikke introduserer ikke ny dynamikk i sløyfen.

10.2 Utvikling av foroverkoplingsfunksjoner fra differensiallikningsmodeller

Foroverkoplingsfunksjoner kan enkelt utvikles fra en differensiallikningsmodell av prosessen. Prinsippet er, som nevnt ovenfor, å beregne pådraget fra prosessmodellen med referansen innsatt for prosessutgangen. I underkap. 10.3 skal vi utlede foroverkoplingsfunksjoner fra en transferfunksjonsmodell, men de vil fungere korrekt bare omkring et bestemt arbeidspunkt (der den lineære transferfunksjonsmodellen er utviklet), med mindre prosessmodellen i utgangspunktet *er* lineær. En foroverkopling basert på den fulle (og muligens ulineære) modellen, kan anvendes i alle arbeidspunkter og er derfor mer anvendbar.

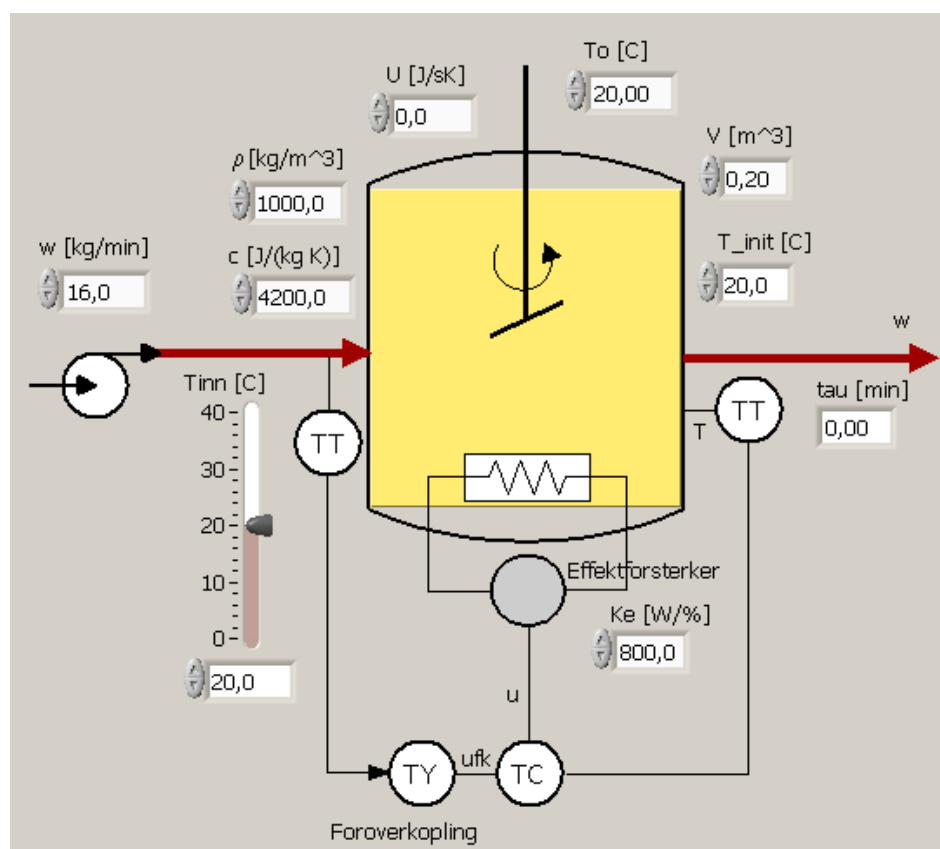
Eksempel 44 viser at reguleringsavviket kan reduseres betraktelig selv om foroverkoplingen ikke er perfekt.

Eksempel 44 *Utvikling av foroverkopler fra differensiallikningsmodell (for termisk system)*

Figur 10.2 viser en væsketank der temperaturen T skal reguleres med tilbakekopling med PID-regulator kombinert med foroverkopling. Vi antar at prosessmodellen er (basert på energibalanse):

$$c\rho V\dot{T}(t) = \underbrace{K_e u(t)}_P + cw [T_{inn}(t) - T(t)] + U [T_o(t) - T(t)] \quad (10.1)$$

der T [K] er temperaturen i tanken, T_{inn} [K] er innløpstemperatur, T_o [K] er omgivelsestemperatur, c [J/(kg K)] er spesifikk varmekapasitet, w [kg/s] er massestrømning (samme inn som ut), V [m³] er volumet, ρ [kg/m³] er tetthet, U [(J/s)/K] er totalt varmeovergangstall, $P = K_e u$ [J/min] er tilført effekt via varmeelementet der K_e er en parameter og u [%] er styresignal til varmeelementet. $c\rho VT$ er (den temperaturavhengige) energien i tanken. Vi kan betrakte T_{inn} og T_o som forstyrrelser, men utledningen av den totale foroverkoplingsfunksjonen F_f er ikke avhengig av at vi foretar en slik klassifisering. I det etterfølgende skal vi for enkelhets skyld anta at varmeovergangstallet U er 0.



Figur 10.2: Væsketank der temperaturen T skal reguleres med tilbakekopling kombinert med foroverkopling. TY = regneelement knyttet til temperaturreguleringen.

Vi skal finne foroverkopplingsfunksjonen ut fra prosessmodellen. Vi setter temperaturreferansen T_r inn for T i modellen (10.1):

$$c\rho V\dot{T}_r(t) = K_e u(t) + cw [T_{inn}(t) - T_r(t)] \quad (10.2)$$

Vi løser (10.2) med hensyn på pådraget u for å finne foroverkopplingsignalet u_f :

$$u_f(t) = \frac{1}{K_e} \left\{ c\rho V\dot{T}_r(t) - cw [T_{inn}(t) - T_r(t)] \right\} \quad (10.3)$$

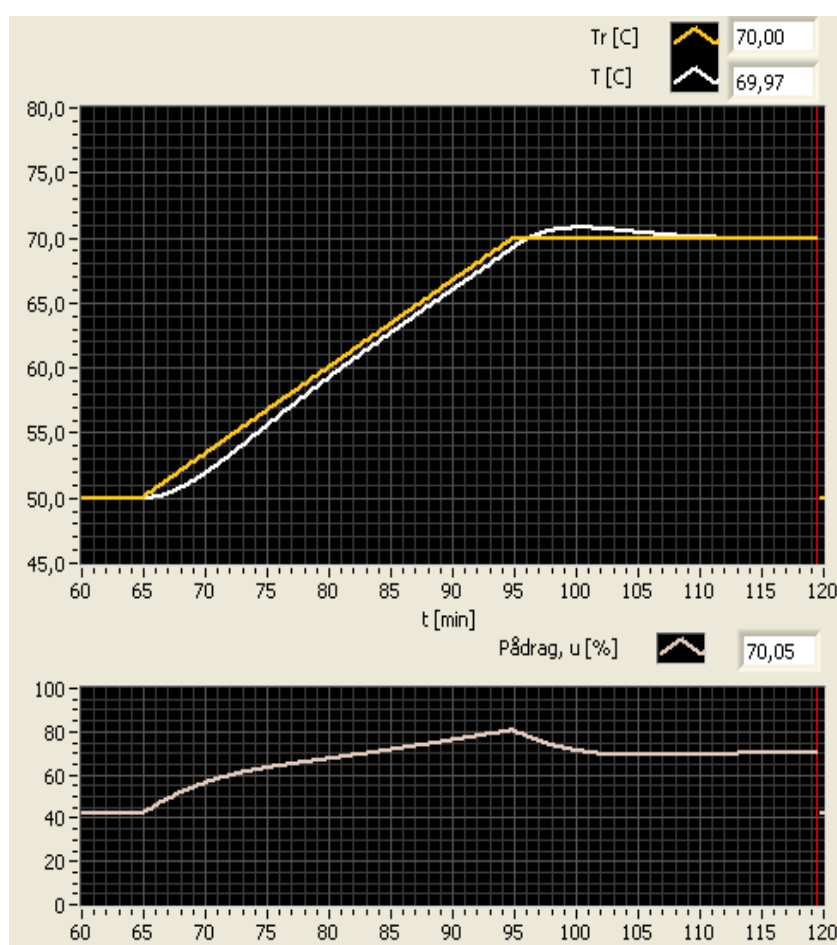
$$= \underbrace{\frac{1}{K_e} [c\rho V\dot{T}_r(t) + cwT_r(t)]}_{u_{fr}} + \underbrace{\frac{1}{K_e} [-cwT_{inn}(t)]}_{u_{ff}} \quad (10.4)$$

Vi ser at beregning av foroverkopplingsignalet u_f krever måling (eller på

annen måte kjennskap til) 5 størrelser: c , ρ , V , h , w , K_e og T_{inn} , samt referansens deriverte, \dot{T}_r .

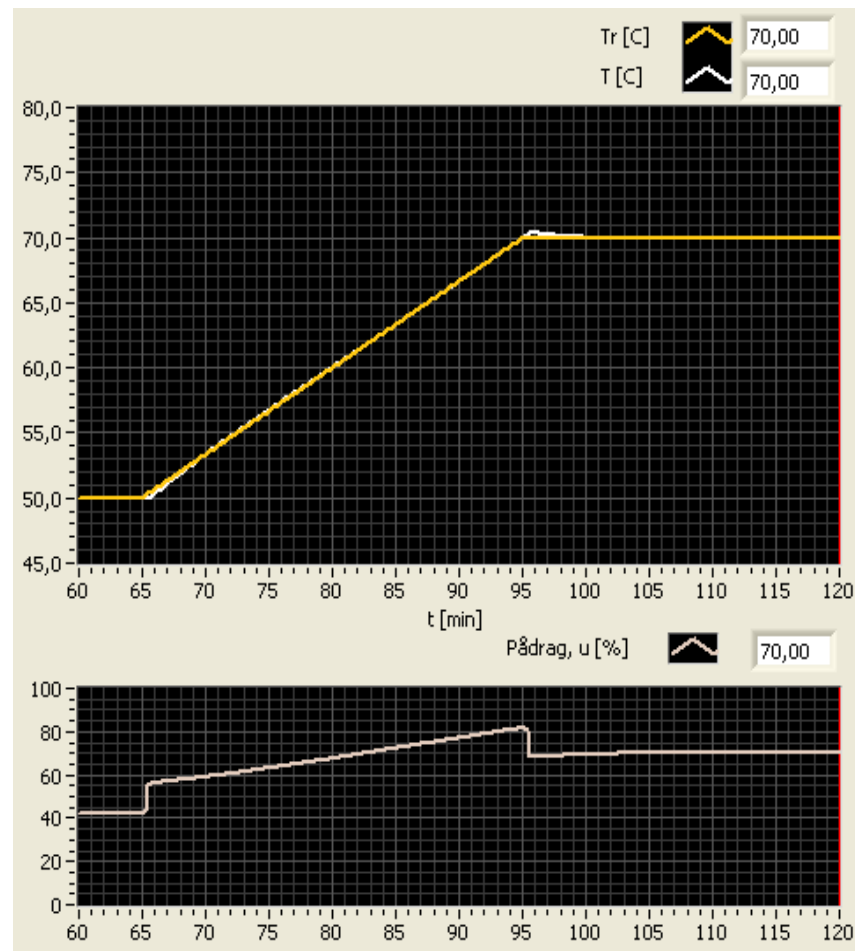
Vi skal se på simuleringer av følgende tilfeller:

- **Uten foroverkopling**, men vanlig PI-regulering (med passende innstilt PI-regulator). T_r endres som en rampe. Se figur 10.3. Nøyaktig avlesning viser at det stasjonære reguleringsavviket når T_r er rampeformet, er ca. $e_s = 0,7$ K.



Figur 10.3: Eksempel 44: Simulering av temperaturreguleringssystem med PID-regulering, uten foroverkopling.

- **Med foroverkopling** ihht. (10.4) i tillegg til vanlig PID-regulering. Se figur 10.4. Reguleringsavviket er svært lite. Ideelt sett skal avviket

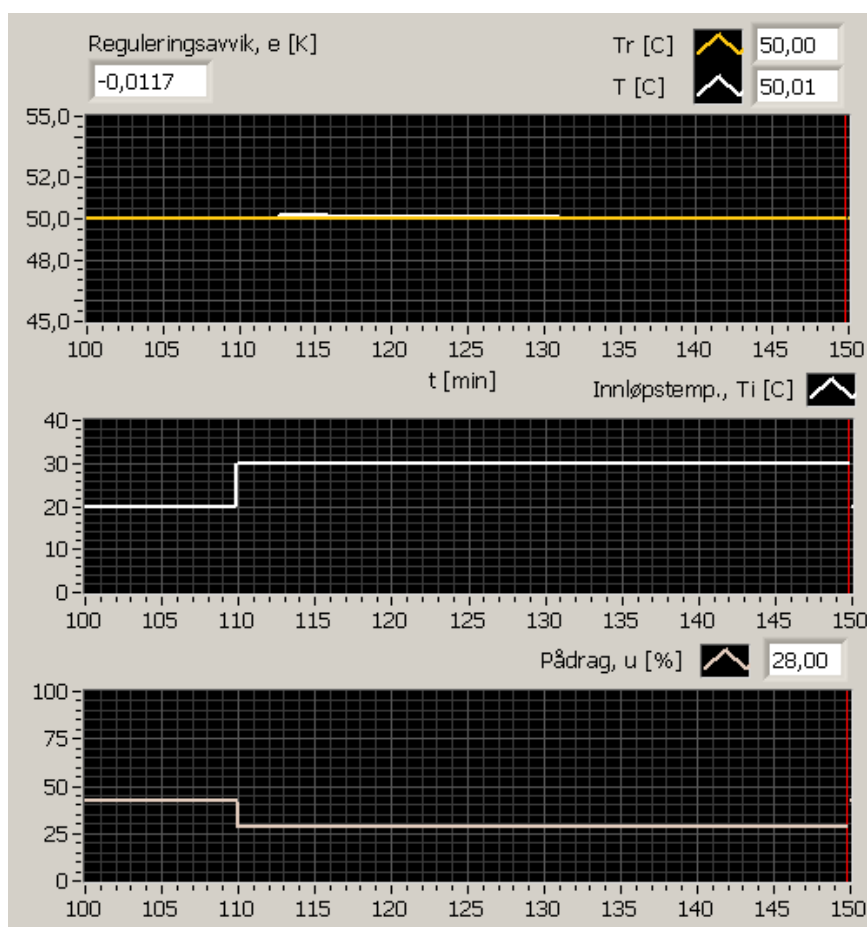


Figur 10.4: Eksempel 44: Simulering av temperaturreguleringssystem med tilbakekoplet PID-regulering sammen med foroverkopling ihht. (10.4)

være null. At det er litt forskjellig fra null, skyldes at foroverkoplingen ikke er eksakt implementert siden \dot{T}_r er realisert med Eulers bakovermetode.

- **Med foroverkopling** ihht. (10.4) i tillegg til vanlig PID-regulering. Referansen er nå konstant, men det er et sprang i forstyrrelsen T_{inn} (innløpstemperaturen), se figur 10.5. Vi ser at pådraget kompenserer momentant for forstyrrelsen, hvilket er takket være foroverkoplingen, og at reguleringsavviket er så å si null hele tiden (at det er litt forskjellig fra null skyldes numeriske forhold i simulatoren).

[Slutt på eksempel 44]



Figur 10.5: Eksempel 44: Simulering av temperaturreguleringssystem med tilbakekoplet PID-regulering sammen med foroverkopling ihht. (10.4). Det er sprang i T_{inn} .

10.3 Utvikling av foroverkopplingsfunksjoner fra transferfunksjonsmodeller

Alle lineære prosessmodeller kan skrives på formen

$$y(s) = H_u(s)u(s) + H_v(s)v(s) \quad (10.5)$$

der u er pådrag, v er forstyrrelse og y er prosessutgang. Vi antar at referansen for $y(s)$ er $y_r(s)$. Vi skal finne foroverkopplingsfunksjoner som gir null reguleringsavvik for alle referansesignaler y_r og alle forstyrrelsessignaler v . Vi setter da $y_r(s)$ i stedet for $y(s)$ i modellen (10.5)