



Høgskolen i Telemark

Avdeling for teknologiske fag

SLUTTPRØVE

EMNE: EK3114 Automatisering og vannkraftregulering.

EMNEANSVARLIG: Finn Aakre Haugen (tlf. 97019215).

KLASSE(R):	DATO: 15.12.2014	TID: 5 timer	
Sluttprøven består av følgende:	Antall sider: 14 (utenom denne forsiden)	Antall oppgaver: 15	Antall vedlegg: 1
Tillatte hjelpemidler:	Ingen (heller ikke kalkulator)		
	Lærerne i emnet besøker ikke eksamenslokalene med mindre emneansvarlig eller eksamensansvarlig finner det nødvendig. Studenter kan ikke kalle på noen av lærerne for å få hjelp til å tolke oppgavene.		
KANDIDATEN MÅ SELV KONTROLLERE AT OPPGAVESETTET ER FULLSTENDIG.			

Høgskolen i Telemark. Emneansvarlig: Finn Aakre Haugen (finn.haugen@hit.no).

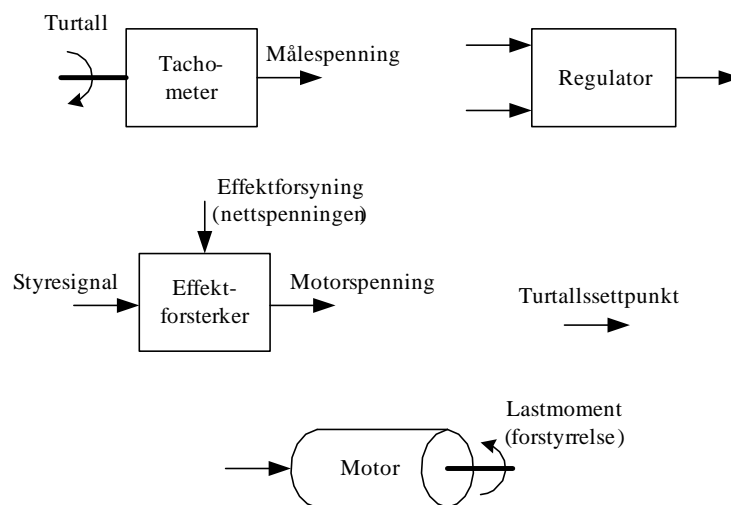
Sluttprøve i emne EK3114 Automatisering og vannkraftregulering

Sluttprøvens dato: 15. desember 2014. Varighet 5 timer. Vekt i sluttkarakteren: 100%.

Hjelpemidler: Ingen trykte eller håndskrevne hjelpemidler. Kalkulator ikke tillatt (hvis du ikke kan regne ut sluttsvaret for hånd, er det godt nok som svar at du setter opp uttrykket som kan beregnes med kalkulator dersom du hadde hatt en). Vedlegg A inneholder informasjon som kan være nyttig for løsning av noen av oppgavene.

Hvis du mener at det mangler forutsetninger for å løse en oppgave, skal du selv definere passende forutsetninger og angi dem i besvarelsen, slik at du allikevel kan løse oppgaven.

1. (5%) Figur 1 viser komponentene i et turtallsreguleringssystem for en elektrisk motor. (Turtall = rotasjonshastighet = vinkelhastighet.)

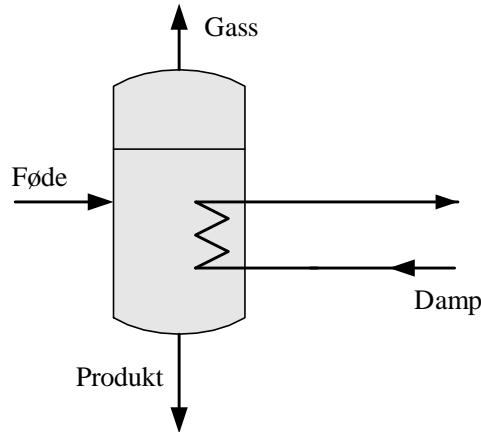


Figur 1: Turtallsreguleringssystemets komponenter. (Tachometer er turtallsensor.)

“Sy” (tegn) delene sammen slik at de utgjør et (tilbakekoplet) hastighetsreguleringssystem. Angi hva som er aktuator, prosess og sensor.

2. (10%) Figur 2 viser en fordampner (eng.: evaporator) der ønsket

produkt framkommer ved fordampning i tanken. Fordamperen skal



Figur 2: Fordamper (eng.: evaporator)

reguleres med tre reguleringsløyper:

- En nivåreguleringsløyfe: Sensoren måler væsknivået i tanken. Aktuatoren er en FC-ventil (Fail Closed) i produkrørledningen.
- En trykreguleringsløyfe: Sensoren måler trykket i gassen i tanken. Aktuatoren er en FO-ventil (Fail Open) i gassrørledningen.
- En konsentrasjonssløyfe: Sensoren måler konsentrasjonen av en bestemt produktkomponent i væskefasen i tanken. Aktuatoren er en ventil som styrer dampstrømmen inn til fordamperen.

Tegn et teknisk flytskjema for reguleringsystemet for fordamperen. Bruk parallell nummerering. Signalene er elektriske. Angi bokstav- og tallkoder for fordamperen og ventilene (velg selv passende bokstavkode for konsentrasjon).

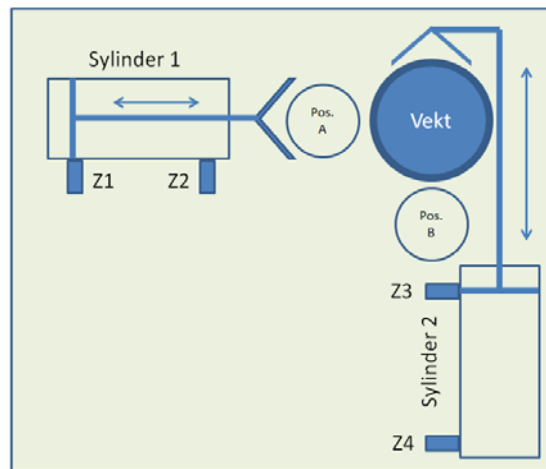
3. (5%) Gitt en temperatursensor av typen Pt100-element som er i stand til å dekke området $-200 - +500$ °C. Den er justert til å dekke måleområdet $15-45$ °C.

Hva er sensorens nullpunkt? Måleomfang? Nedre prosessverdi? Øvre prosessverdi?

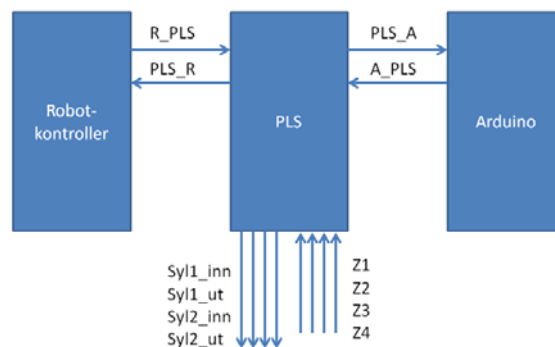
4. (5%) Dimensjoner en reguleringsventil i en rørledning for olje ut fra følgende spesifikasjoner: Trykkfallet over ventilen er stort sett konstant og lik $0,5$ bar. Temperaturen er ca 15 °C. Den maksimale oljestrømmen som ventilen skal kunne levere under normale forhold,

er 15 L/min, men det skal legges inn en kapasitetsmargin på 50%, dvs. at ventilen skal dimensjoneres til å kunne levere 50% større strøm enn den normale maksimale strømmen. (Det forventes ikke at du regner sluttsvaret fullt ut. Det er tilstrekkelig at du angir en formel for å beregne sluttsvaret.)

5. (5%) Tegn et teknisk flytskjema av et konkret eksempel på et kaskadereguleringssystem. Forklar systemets virkemåte.
6. (5%) Tegn et generelt blokkdiagram av et reguleringssystem som består av både tilbakekopling og foroverkopling. Forklar systemets virkemåte.
7. (5%) Gitt en prosess som du antar har “tidskonstant med tidsforsinkelse”-dynamikk. Skisser prinsipielt (ingen beregninger forventes) prosessens sprangrespons, og angi på sprangresponsen hvordan forsterkningen K , tidskonstanten T og tidsforsinkelsen τ framkommer (i responsen).
8. (5%) Forklar, med utgangspunkt i PI-regulatorfunksjonen, hvorfor integralleddet i en PI-regulator sørger for at det statiske (eller stasjonære) reguleringsavviket blir null.
9. (5%) En PI-regulator for en gitt prosess skal stilles inn med Skogestads metode. Når prosessen påtrykkes et sprang med amplitude 20%, viser responsen i prosessmålingen først en tidsforsinkelse på 1 min. Deretter (etter tidsforsinkelsen) stiger responsen som en rampe med stigningstall 10 %/min. Still inn regulatoren.
10. (5%) Anta at en P-regulator er stilt inn med Ziegler-Nichols’ (svinge)metode. Hvor stor er reguleringssystemets forsterkningmargin (GM)?
11. (15%) *Bakgrunn for oppgaven:* I et produksjonsanlegg for flytende næringsmidler er det montert et veiesystem som skal kontrollere at mengden væske i hver produserte beholder er innenfor gitte krav, se figur 3. Veiesystemet er knyttet opp mot en Arduino Uno mikrokontroller som leser av vekten og sender måledataene videre til en database. Beholderne blir plassert på og hentet fra veiesystemet ved hjelp av en seks-akset robot fra Mitsubishi. Robotarmens bevegelser styres av en robotkontroller. I veiesystemet er det to sylindere, Sylinder 1 og Sylinder 2, som skyver beholderne inn på og ut fra vekta. Sylindere styres av en LOGO! PLS. Hensikten med sylindere er å unngå at vekta blir ødelagt av roboten. Det kan skje hvis roboten utfører en feil bevegelse. På hver sylinder er det sensorer



Figur 3: Veiesystem sett ovenfra.



Figur 4: Signaler til og fra PLS'en.

(Z1–Z4) som registrerer om stempelet er inne eller ute. PLS'en er koplet til robotkontrolleren og Arduino'en for å kunne utveksle handshake-signaler. Figur 4 viser signaler til og fra PLS'en. Tabell 1 definerer signalene inn til PLS'en, og tabell 2 definerer signalene ut av PLS'en.

Oppgave: Du skal lage et SFC-diagram for PLS-programmet i dette systemet i henhold til beskrivelsen under. Vi antar at roboten og Arduino'en er ferdig programmert. Initialtilstand: Sylinderne er plassert som indikert i figur 3. Det er ingen beholdere hverken i Pos. A, Pos B. eller på vekta. Robotkontrolleren og Arduino'en kjører sine program. Sekvensen starter når roboten setter en beholder i Pos. A. Når PLS'en har fått signal om dette, skyver Sylinder 1 beholderen over på vekta fra Pos. A. For at det ikke skal bli kollisjon med

roboten skal det gå ett sekund fra PLS'en får beskjed fra roboten til sylindren settes i bevegelse. Når beholderen er skjøvet over på vekta, trekkes sylindren tilbake. Deretter gir PLS'en signal til Arduino'en at den kan begynne å måle. Når målingen er utført, gir Arduino'en signal tilbake til PLS'en om dette. Sylind 2 skyver da beholder vekk fra vekta og ut til Pos. B. Når beholderen er i Pos. B gir PLS'en signal til roboten at den skal hente beholderen der. Sekvensen hopper så tilbake til utgangspunktet. SFC-diagrammet skal tegnes i henhold til standarden som er undervist.

Tabell 1: Signaler inn til PLS'en.

Signalnavn	Beskrivelse
R_PLS	Indikerer at roboten har satt en beholder i Pos. A.
A_PLS	Indikerer at vektmålinger er utført.
Z1	Indikerer at stempelet i Sylind 1 er inne.
Z2	Indikerer at stempelet i Sylind 1 er ute.
Z3	Indikerer at stempelet i Sylind 2 er ute.
Z4	Indikerer at stempelet i Sylind 2 er inne.

Tabell 2: Signaler ut av PLS'en.

Signalnavn	Beskrivelse
PLS_R	Indikerer at roboten skal hente beholderen i Pos. B. Dette skal være en puls med varighet $T = 100\text{ms}$.
PLS_A	Indikerer at vektmålinger skal starte. Dette skal være en puls med varighet $T = 100\text{ms}$.
Syl1_inn	Stempelet i Sylind 1 skal skyves inn.
Syl1_ut	Stempelet i Sylind 1 skal skyves ut.
Syl2_inn	Stempelet i Sylind 2 skal skyves inn.
Syl2_ut	Stempelet i Sylind 2 skal skyves ut.

12.

- (a) (5%) Hva menes med begrepet "et synkront system" når vi omtaler kraftsystemet f.eks. i Norden? Hvor stort frekvensavvik tillates normalt i et slikt synkront system?
- (b) (5%) Hvor stor må generelt primærreguler- og sekundærreguler-reserve være for at en i et synkront kraftsystem skal kunne motstå alle enkelthendelser uten at frekvensen kommer utafor grenseverdiene? Hva vil skje dersom ikke primærreserven er tilstrekkelig ved største enkeltutfall i et synkront system?

13. (5%) Kraftsystemet består av kraftverk, kraftnett og forbruk av elektrisk energi. Kraftnettet er inndelt i tre hovednivåer. Nevn disse tre nivåer og typiske spenningsnivåer for hvert av disse. Beskriv også prinsippene for kontroll av spenningen på de ulike nettnivåene.

14.

- (a) (5%) Formelen for effekt i et vannkraftverk er

$$P = \rho \eta g H Q \quad (1)$$

Gi en beskrivelse av de ulike størrelsene i formelen, og angi hvilke enheter de ulike størrelsene angis i. Beregn effekten i et vannkraftverk med fallhøyde 20 m og vannføring inntil 144.000 m³/h. Angi hvilke antagelser du gjør med hensyn på de øvrige størrelser i formelen. Hvor mange kWh produseres av denne vannmengden pr. døgn?

- (b) (5%) Nevn de tre viktigste typer turbiner som benyttes i norske vannkraftverk og angi hvilken av disse typer er 'mest anvendelig' med hensyn på ulike kombinasjoner av fallhøyde og vannføring.

15. (5%) Et synkront kraftsystem i forenklet forstand består av to områder A og B, som er forbundet med overføringsledninger som har begrenset overføringsevne slik at produksjonen i disse to områdene må tilpasses slik at overføringen mellom områdene ikke overbelastes. Dette er viktig for driftsikkerheten for hele systemet. Regulerstyrken i område A er $R_a = 3000 \text{ MW/Hz}$ og $R_b = 2000 \text{ MW/Hz}$ i B. Vi betrakter dette systemet og på et tidspunkt er overføringen fra B til A 100 MW og frekvensen er nominell 50,0 Hz. I område B oppstår det feil i en transformator som forsyner et større regionalnett med 150 MW last og ingen produksjon, og dette regionalnettet blir spenningsløst.

Er kriteriet n-1 tilfredsstilt i dette tilfellet? Beregn stasjonært frekvensavvik etter at denne feilen oppstod? Hvor stor blir endringer i effektflyt mellom områdene A og B pga. lastutfallet? (En ser bort fra evt. andre endringer i nettsystemet.) Hvilke andre tiltak bør settes i verk for å gjenopprette driftsituasjonen?

Vedlegg A: Informasjon som kan være relevante i noen av oppgavene

$$e = y_{SP} - y \quad (2)$$

$$\text{IAE} = \int_{t_{\text{start}}}^{t_{\text{slutt}}} |e(t)| dt \approx T_s \sum_{t_1=t_{\text{start}}}^{t_N=t_{\text{slutt}}} |e(t_k)| \quad (3)$$

$$F_{2_{SP}} = KF_1 \quad (4)$$

$$y_d = \frac{b_{n-1}2^{n-1} + \dots + b_12^1 + b_02^0}{2^n - 1} (y_{a_{\text{maks}}} - y_{a_{\text{min}}}) + y_{a_{\text{min}}} \quad (5)$$

$$R = \frac{y_{a_{\text{maks}}} - y_{a_{\text{min}}}}{2^n - 1} \quad (6)$$

$$P = \frac{P_2 - P_1}{M_2 - M_1} (M - M_1) + P_1 \quad (7)$$

$$T_f \dot{y}_{mf}(t) = y_m(t) - y_{mf}(t) \quad (8)$$

$$y_{mf}(t_k) = (1 - a)y_{mf}(t_{k-1}) + ay_m(t_k) \quad (9)$$

$$a = \frac{T_s}{T_f + T_s} \quad (10)$$

$$\tau_{\text{rampe}} = T_f \quad (11)$$

$$T_f \approx \frac{T_s}{2} \frac{1}{(\sigma_{y_{mf}}/\sigma_{y_m})^2} \quad (12)$$

$$T_f \leq \frac{T_p}{10} \quad (13)$$

$$T_f \leq \frac{\tau_p}{10} \quad (14)$$

$$y_{mf}(t_k) = \frac{1}{N} \sum_{j=k-(N-1)}^{j=k} y_m(t_j) \quad (15)$$

$$T_f \approx \frac{T_v}{2} \quad (16)$$

$$u_{se} = \frac{u_{se2} - u_{se1}}{u_{fe2} - u_{fe1}} (u_{fe} - u_{fe1}) + u_{se1} \quad (17)$$

$$\tau_{\text{DA-omsetter}} \approx \frac{T_s}{2} \quad (18)$$

$$D = \frac{T_{\text{on}}}{T_p} \cdot 100\% = \frac{u_{\text{mean}}}{U_{\text{on}}} \cdot 100\% \quad (19)$$

$$Q = K_v(z) \sqrt{\frac{p_v}{G}} \text{ eller } K_v \sqrt{\frac{p_v}{G}} \quad (20)$$

$$K_v(z) = K_{v_{\text{max}}} z \quad (21)$$

$$K_v(z) = K_{v_{\text{max}}} R^{1-z} \quad (22)$$

$$P_{\text{midlere}} = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R} \quad (23)$$

$$R_s = \frac{R}{L} [\Omega/\text{m}] \quad (24)$$

$$R [\Omega] = \frac{u}{i} \quad (25)$$

$$R = \frac{S}{2^n - 1} \quad (26)$$

$$v_0(T_m) = v + v_0(T_r) \quad (27)$$

$$T = \frac{\frac{R}{R_0} - 1}{a} \quad (28)$$

$$L = \frac{v T_r}{2} \quad (29)$$

$$p = \rho g(h + h_0) \quad (30)$$

$$F = k \sqrt{\Delta p} \quad (31)$$

$$v = k(t_{\text{mot}} - t_{\text{med}}) \quad (32)$$

$$Q = Av \quad (33)$$

$$F_v = \frac{Fm}{\rho} \quad (34)$$

$$\Delta T = T_2 - T_1 = kF \quad (35)$$

$$v(t_k) = \frac{ds(t_k)}{dt} \approx \frac{s(t_k) - s(t_{k-1})}{T_s} \quad (36)$$

$$v(t_k) \approx \frac{s(t_{k+1}) - s(t_{k-1})}{2T_s} \quad (37)$$

$$u_t = K_t v \quad (38)$$

$$\frac{dm(t)}{dt} = \sum w_{\text{inn}}(t) - \sum w_{\text{ut}}(t) + \sum w_{\text{generert}}(t) \quad (39)$$

$$m = \rho V \quad (40)$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum Q_{\text{inn}} - \sum Q_{\text{ut}} + \sum Q_{\text{generert}} \quad (41)$$

$$E = cmT = c\rho VT = CT \quad (42)$$

$$m\dot{v} = m\ddot{x} = ma = \sum F \quad (43)$$

$$J\dot{\omega} = J\ddot{\theta} = \sum T \quad (44)$$

$$T = Fl \quad (45)$$

$$b = \theta r \quad (46)$$

$$u = Ri \quad (47)$$

$$P = ui = Ri^2 = \frac{u^2}{R} \quad (48)$$

$$P_{\text{midlere}} = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} = R I_{\text{eff}}^2 = \frac{U_{\text{eff}}^2}{R} \quad (49)$$

$$I_{\text{eff}} = \frac{I_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \quad (50)$$

$$U_{\text{eff}} = \frac{U_{\text{maks}}}{\sqrt{2}} \quad (51)$$

$$u = u_t + u_f \quad (52)$$

$$K = \frac{y_2 - y_1}{u_2 - u_1} = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (53)$$

$$T\dot{y} = Ku - y \quad (54)$$

$$T\dot{y} = K_1 u_1 + K_2 u_2 - y \quad (55)$$

$$\dot{y} = K_i u \quad (56)$$

$$y(t) = K_i \int_0^t u(\tau) d\tau \quad (57)$$

$$y(t) = u(t - \tau) \quad (58)$$

$$u(t) = u_{\text{man}} + K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$e = y_{SP} - y_{mf} \quad (59)$$

$$\text{PB} = \frac{100}{K_p} \quad (60)$$

$$u(t_k) = u_{\text{man}} + u_p(t_k) + u_i(t_k) + u_d(t_k) \quad (61)$$

Tabell 3:

	K_p	T_i	T_d
P-regulator	$0,5K_{pu}$	∞	0
PI-regulator	$0,45K_{pu}$	$\frac{P_u}{1,2}$	0
PID-regulator	$0,6K_{pu}$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8} = \frac{T_i}{4}$

$$u_p(t_k) = K_p e(t_k) \quad (62)$$

$$u_i(t_k) = \frac{K_p T_s}{T_i} [e(t_0) + e(t_1) + \dots + e(t_{k-1}) + e(t_k)] \quad (63)$$

$$= u_i(t_{k-1}) + \frac{K_p T_s}{T_i} e(t_k) \quad (64)$$

$$u_d(t_k) = K_p T_d \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T_s} \quad (65)$$

$$\text{“Opp-Ned”} \implies \text{Revers} \equiv K_p > 0 \quad (66)$$

$$\text{“Opp-Opp”} \implies \text{Direkte} \equiv K_p < 0 \quad (67)$$

$$u = \left\{ \begin{array}{l} u_{\text{maks}} \text{ n\aa}r \ e \geq d_e \\ u_{\text{min}} \text{ n\aa}r \ e < -d_e \end{array} \right\} \quad (68)$$

$$K_p = 0,32K_{pu}, \quad T_i = P_u \quad (69)$$

$$K_p = 0,45K_{p0}, \quad T_i = \frac{P_{u0}}{1,2} \quad (70)$$

$$K_{pu} = \frac{\text{Ut-amplitude}}{\text{Inn-amplitude}} = \frac{\frac{4A}{\pi}}{E} = \frac{4A}{\pi E} \approx 1,27 \frac{A}{E} \quad (71)$$

$$A = \frac{u_{\text{maks}} - u_{\text{min}}}{2} \quad (72)$$

$$K_p = 0,8K_{GG}, \quad T_i = 1,5T_{ou} \quad (73)$$

$$K_p = \frac{1}{K_i(T_C + \tau)}, \quad T_i = 2(T_C + \tau) \quad (74)$$

$$T_C = \tau, K_p = \frac{1}{2K_i\tau}, T_i = 4\tau \quad (75)$$

$$K_p = \frac{1}{K_i T_c}, T_i = 2T_c \quad (76)$$

$$T_d = T_{\text{aktuator}} \quad (77)$$

$$\ddot{y} = K_{ii}u$$

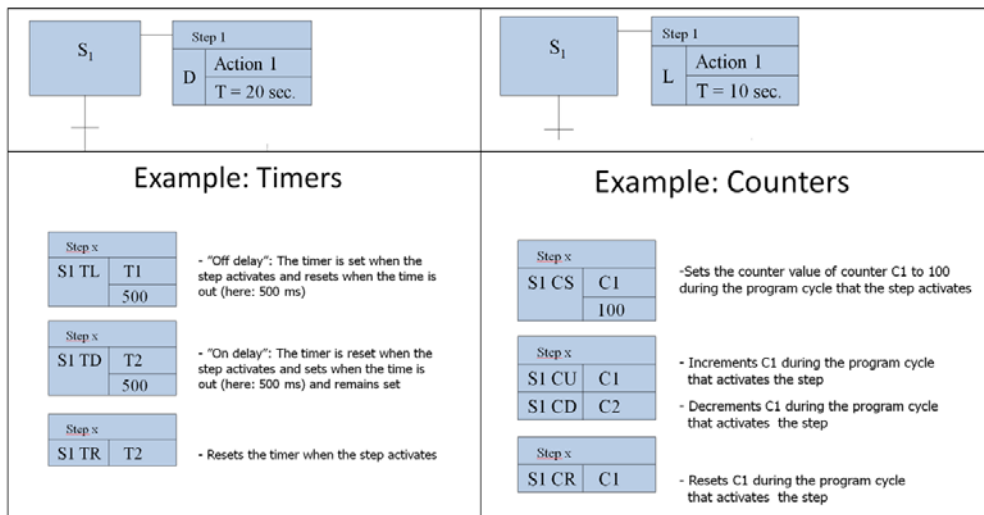
$$K_p = K_{pp} = \frac{2}{K_{ii} T_C^2} \quad (78)$$

$$T_i = T_{i_p} = 4T_C \quad (79)$$

$$T_d = T_{d_p} = T_C \quad (80)$$

$$GM = \Delta K_u \quad (81)$$

$$PM = \frac{\Delta\tau_u}{P_u} \cdot 360^\circ \quad (82)$$



Figur 5:

Tabell 4:

Bokstav- kode	1. bokstav	Etterfølgende modifikator til 1. bokstav	Etterfølgende bokstav
A	Analysis		Alarm
B	Burner, Combustion		
C	User's choice		Control
D	User's choice	Differential	
E	Voltage		Sensor, Primary element
F	Flow rate	Ratio	
G	User's choice		Glass, Gauge
H	Hand		High
I	Current (electrical)		Indicate
J	Power		
L	Level		Low
P	Pressure		
Q	Quantity	Integrate, Totalize	
R	Radiation		Record
S	Speed, Frequency		Switch
T	Temperature		Transmit
V	Vibration		Valve
W	Weight, Force		
Y			Computation
Z	Position	Safety Instrumented System (Interlock)	

Tabell 5:

Bokstavkode	Utstyr
C	Column (norsk: kolonne, f.eks. destillasjonskol.)
D	Drum (kar, fat, dunk)
F	Furnace (ovn)
H	Heat exchanger (varmeveksler)
K	Compressor
M	Motor
P	Pump
R	Reactor
T	Tank
V	Valve, vessel (ventil, beholder)

Vannkraftverk I.

- Effekt vannkraftverk: $P = \rho \eta_{\text{tot}} g Q H$ [W]
 - $[\text{kg}/\text{m}^3] [1] [\text{m}/\text{s}^2] [\text{m}^3/\text{s}] [\text{m}] = [\text{kg m}/\text{s}^2 \text{m}/\text{s}] = [\text{Nm}/\text{s}] = [\text{W}]$
 - Ex: $P = 1000 \cdot 0,88 \cdot 9,81 \cdot 1 \cdot 250 \text{ W} = 2,16 \cdot 10^6 \text{ W} = 2,16 \text{ MW}$
- Tap i væskestrøm i rør / tunell:
 - $\Delta H = k_q Q^2 = k_v v^2$
 - Virkningsgrad for turbin. Max. 80 – 96 %.
 - Turbintyper: Pelton. Kaplan. Francis. Noen typiske egenskaper. Q/H-diagrammet.
- Statikk: δ [%] = $100 \times (\Delta f/f_n) / (\Delta P/P_n)$ m/tilhørende kurve
- ▶ Regulerstyrke: R [MW/Hz] = $-\Delta P/\Delta f = -2 P_n[\text{MW}] / \delta$ [%]

Figur 6:

Vannkraftverk II.

- Forutsetning for 'god' regulering: $3 < T_a / T_w < 4$; FIKS krever 4.
- T_w – i stor grad gitt av Q & H. Optimalisert fra falltap & økonomi.
 - T_a – Økt treghetsmoment gjør generatoren tyngre / større og dyrere.
- ▶ Vinkelfrekvens: $\omega = 2\pi n/60$ [s^{-1}]
 - ▶ Akselerasjon for aggregat: $T_a = J$ [kgm^2] ω_N^2 [$1/\text{s}^2$] / P_N [W]
 - ▶ Akselerasjonstid for vannveg: $T_w = Q_o L / (g H A)$
 - ▶ Skogestads metode – frekvensregulering:
 - $\tau \approx 1,7 \cdot T_w / K_i = 1/T_a / 1/K_p = K_i (T_c + \tau) / T_i = c (T_c + \tau) / c = 2 / T_c = \tau$
 - ▶ Spenningsregulering: Takspenningsfaktor 2.
 - ▶ Skogestads metode & vannstandsregulering.
 - Generell metode med en integrator uten transportforsinkelse.

Figur 7: