

Department of Chemical Engineering

# Exam paper for TKP4140 – Process Control

Academic contact during exam: Sigurd Skogestad Phone: 91371669

Examination date: 09 December 2019 Examination time (from-to): 15:00 – 19:00 Permitted examination support material: One (1) A4 double-sided piece of paper with your handwritten notes. Standard calculator.

Other information: State clearly all assumptions you make. You may answer in Norwegian or English

Language: English Number of pages (front page excluded): 5 (including Bode paper which may be handed in)

Informasjon	om trykking av eksamensoppgave	]
Originalen er	:	
1-sidig 🛛	2-sidig □	
sort/hvit 🛛	farger 🗆	
skal ha flerval	gskjema 🗆	

Checked by:

Date

Signature

#### Problem 1 – Modelling and linearization of level (20 %)

Consider the cylindric tank with liquid inflow  $q_0$  [m<sup>3</sup>/min] and one liquid outflow  $q_1$  [m<sup>3</sup>/min]. The outflow is proportional to the level h [m] and is given by  $q_1 = k$  h (this could be either because of self-regulation or because we use a P-controller for level).

(a) (15%) Assume the area A [m<sup>2</sup>] of the tank is constant, as shown in the figure below. (i) Formulate the mass balance, (ii) find the nominal steady-state value of the level and volume (see data below), (iii) linearize the equations and (iv) find the transfer function t(s) from q<sub>0</sub> to h around the nominal steady state.



Cylindric tank with constant area A

Data:  $A = 10 m^2$ ,  $q_1 = k h$ ,  $k = 0.02 m^2/s$ . Nominal inflow:  $q_0 = 0.1 m^3/s$ .

(a) (5%) In reality, the tank is conic as shown below, and the area is proportional with the square of the level. Do the same as above, (i-iv), for this case.



Conic tank with varying area A(h)

Data:  $A(h)=0.4 h^2$ ,  $q_1 = k h$ ,  $k= 0.02 m^2/s$ . Nominal inflow:  $q_0 = 0.1 m^3/s$ . Tank volume:  $V(h) = \int_0^h A(h) dh$ 

### Problem 2 – Level control (20 %)

Consider the tank with one inflow  $q_0$  (disturbance) and one outflow  $q_1$  (input, MV), shown in the figure below. The level h is controlled using a P-controller and the closed-loop time constant is 0.5 [min].

(a) (5%) The closed-loop response from the disturbance  $q_0$  to the input  $q_1$  is then  $q_1 = \frac{1}{0.5s+1} q_0$ . Explain why this is correct (why is the gain 1 and the time constant 0.5?).

(b) (5%) Sketch the response for  $q_1$  to a unit step change in  $q_0$  of magnitude 1.

(c) (10%) Sketch the response q<sub>1</sub>(t) to a sinusoidal disturbance in the flow q<sub>0</sub> of magnitude ± 1 and frequency  $\omega = 4 \left[\frac{rad}{min}\right]$ , that is, q<sub>0</sub>(t)= sin( $\omega$ t). In particular, what is the period of the oscillations and what is the magnitude of the variations in q<sub>1</sub>?



#### Problem 3 – Controller tuning (30 %)

Consider a process  $y(s) = g(s)u(s) + g_d(s)d(s)$ , with

$$g(s) = \frac{3}{(2s+1)(0.5s+1)^2},$$
  
$$g_d(s) = \frac{10}{(2s+1)}$$

We use feedback control and the measurement transfer function for the output y is

$$g_m(s) = \frac{e^{-3s}}{(1.5s+1)}$$

- (a) (5%) Make a block diagram of the system (with symbols only)
- (b) (10%) Derive a PI-controller c(s) for "tight" control using the SIMC-rules. Note that feedback control is based on the measurement of y.
- (c) Consider the closed-loop response for the output y(s) (not the measurement) to a change in the disturbance d,  $y(s) = T_d(s) d$ .
  - (5%) First derive an expression for T<sub>d</sub>(s) with symbols only
  - (2%) Put the transfer function expressions into  $T_d$  (s) and simplify a little.
  - (3%) Sketch the response in y to a step change in d of magnitude 1, both without control and with PI-control.
- (d) (5%) Would you recommend using feedforward control? Explain your answer. You can assume for simplicity that the disturbance can be perfectly measured.

#### Problem 4 – Discrete PI-controller (10 %)

We have a continuous PI-controller u(s) = C(s) e(s) where  $e=(y_s-y)$  and  $C(s) = K_C \left(1 + \frac{1}{\tau_I s}\right)$ . However, we want to implement it using a discrete PI-controller.

- (a) (3%) How can the PI-controller be expressed in the continuous time domain? That is, write an expression for u(t) as a function e(t).
- (b) (3%) Make a plot of a typical time response for discrete control. That is, make a plot of typical continuous signals u(t) and y(t) and show on this plot the discretized values u<sub>k</sub>, u<sub>k-1</sub>, u<sub>k-2</sub>, and y<sub>k</sub>, y<sub>k-1</sub>, y<sub>k-2</sub>. Also show the sampling time Δt. What is k?
- (c) (4%) The discrete PI-controller can be realized as

Integrator (bias update):  $\bar{u}_k = \bar{u}_{k-1} + f_1(e_k)\Delta t$ Overall PI-controller:  $u_k = \bar{u}_k + f_2(e_k)$ 

- What is ek?
- What are f<sub>1</sub>(e<sub>k</sub>) and f<sub>2</sub>(e<sub>k</sub>)? To find these, discretize the continuous Plcontroller from part (a).

#### Problem 5 – Control of heat-to-power cycle (20 %)

Consider a typical steam heat-to-power cycle as shown below. In this cyclic process, thermal energy from hot gas is converted to mechanical energy in the steam turbine and further converted to electrical energy (W) in the generator.

The water/steam cycle: Liquid water is taken from the tank and boosted by a variable speed pump (so P1 is an MV) and fed to the drum. It is heated from liquid water (blue) to high-pressure superheated steam A (red) by exchanging heat with hot gas (black) in two heat exchangers (drum and superheater). The high-pressure superheated steam (A) is expanded to low-pressure saturated steam in a turbine which drives a generator (G) to produce electric power (W) for the electric grid. The low-pressure steam is condensed with cooling water (CW) in the condenser to produce liquid water, which is returned to the tank. Note that since this is a closed system, one of the two levels (drum and tank) in the cycle should be uncontrolled, and since the largest mass is in the tank, we let this level be uncontrolled.



Steam cycle - water in blue, steam in red, hot gas in black, cooling water in light blue

The control objectives are:

- Keep the electrical power produced at the setpoint (W = W<sup>sp</sup> = 100MW).
- Keep the process stable.
- Keep the temperature of the superheated steam at it's maximum, that is, keep it at the setpoint (T<sub>A</sub> = T<sup>sp</sup><sub>A</sub> = 529°C).
- Keep the superheated steam pressure p<sub>A</sub> below 100 bar (you may select to always control steam pressure to be safe).
- Minimize the condenser pressure, p<sub>C</sub>, that is maximize the use of cooling water.

The turbine frequency is fixed (disturbance), which means that there are no degrees of freedom related to the turbine. Note that it is desirable in terms of efficiency (but not necessarily possible if we want to meet all the control objectives) to keep all bypasses closed (i.e. VLV3 and VLV5 closed), and to keep the steam valve VLV2 fully open.

The available measurements are: 1. Power in generator (W). 2. Drum level (L). 3. Superheated steam temperature (TA). 4. Steam pressure ( $p_A$ ). 5. Condenser pressure ( $p_C$ ). 6. All flows, and additional temperatures if needed.

(a) identify controlled variables (CVs), manipulated variables (MVs) and main disturbances.

(b) Propose a control structure based on feedback (you can write on this page and hand in)

## Bode paper:

<b></b>					τt				. J.							1	·	1.1				1		U.J.					ι			111
L		200	с. с С. с	10		20		1011	: 30		12.1	600		::::	200	111	2.00	12	111		St 1 1	111	: 22	33	111	:::	:::	2000	200	111	- 5 - 4 1 - 5 - 4	111
	· ? · ·	0.5	222	11	2.2.2	0.1	• • • •	- 2 	- 11	2 -	÷211	99	222	• • • •	12.11	1.1.1	e e	11	-1-1-1		0.00	211	- 11-	23	111	• • •	• • •	(* * *	200	111	12.3	111
			: · ;					16.53	• • •		· · · ·					; · · ·	e 16	: :	· · · · ·			7 T S		63					e : :			111
[····																1.1.1		11						53								111
		11.1			::::						11	1.11				111	1111	1.1				513		5.5						111	10.0	1.11
L					5.5.5						. t					:	S	1.2				1.1		5.2					S			11
	÷	1	: :	1	: : :	1		1	1	1.	÷.,	11	:::		:	1	: :	::	111		:	: :	1	: :	:::				:	: :	11	
	1	1	: :	1	: : :	1		1	1	1	1	11	:::		:	1	11	1.1	111		1	: :	1	11	111			2	:	: :	100	
L			i.,	d.		ά.		сÈсь.	сż.	с. È	à.	1.1.	e e e			1	i i.,	1.2	л. Q		Ś	6.10	сÂ.	ίż.	222				È., .	1.1		14
		111.1		111		121			: :: :					::::	11111	:::	2002	12				111	1111			111	:::		200		12.5	111
E::::	::::	22.2			222	12.1					1.1		· · · · ·			111	2.22	12	 			200		22		2.2.2	111		211		10.0	111
+ • • • •				- 1 -														4.20				e		• •								~ ~
+ • • • •	. ;	-1	5 - 5	- 4-	299	÷.,		- (	- 4 -	(	÷.,	6.04	222		-1	÷	5-55	14	-0-0-0			2.5.5		14				(	2.5.5	( - (	- 2.3	334
	. ;	1.1	; . ;	1.1	555	з.		. (		(	ф.	C	555		. (J. 1914)	÷	5.00	1.0	-1-1-1			2.1.2		5.2					5	1.1	- 5- 4	111
	1	÷	: :	÷.				÷	÷.	- 2	÷.	11				÷		::					÷.							: :	- 1	
+ • • • •		-1	200	- (-	222	÷		- :		}	÷	ee.	222			÷ • •	h de	14	-1-1-1		de e e	5	[	53			• • •	( · · ·	200	{ + {	- )- <del> </del>	134
			: :			1		1			÷.	1.1			÷	: :	1.1	1.1	111		: :	: : :	1		111					: :	1.1	
	1	÷.,	: :	÷.,	: : :	÷.,		÷	÷.,	1.1	÷.,	÷ ÷ ;			÷	÷	: :	11			÷ .	: :	÷.	11					÷ .	: :	11	
	:;::	:(: :	; : ;	11	222	:50	::::	: ; : :	: :) :	::)::	: ;; ;	0.00	222	::::	11111	;::	2.22	12	:::::	:::::	::::	200	: :(:::	2.5	::::	:::	:::	(:::	5:::	:::	:23	3.55
	1611	201	606	195	666	16.5		2623	: 20	1161	14.1	200	666		2011	300	600	3.2	200		2000	800	191	63	200	111	111	1111	600	111	163	3.22
+ • • • •	· } · ·		÷ - 3		233	÷÷				• • ? •	÷		222	• • • •		÷ • •	e e e					÷;	; -	23					200	: - :	- i - i	
		111	· · ·		222	1						111				111	1111	1.2				212		£ 3.					200	212	10.3	111
			2.13		222											÷ · ·		11				200		11						11		111
	- :	0.5	212	10	200	0.1		- (* e - )	- 11	2 -	÷.	9.01	222		1111	111	2122	11	-000		0.00	210	Ç	23	100			(* * *	200	( * (	12.5	331
L			: :													1	:	1.1				:		11					·	:.:		11
																		11						11								
	1	1	: :	1	: : :	1		1	1	1.1	1	11	:::			1	111	11	111		1	: :	1	11	111			:	:	: :	110	
L	. ;		; . :		511	. j				1	. j					:	<u></u>	12				1.1		11					5	:.:	. ; ; ;	: -
_ <u></u>	: t : i	de é	258	10	228	11	:::	:2::	: 53	::2:	:1:	66	228	::::	deti	111	268	13	588	::::	de e È	t i d	ode.	23	553	:::	:::	is s i	2:5	5:5	:13	333
E		211	e e è		ана ( 1. т. 1.			- 4 - 1 - 5				s di	e e é		200		2.12	11				6	191	2.2					с. і с			331
F:::::	1111	201	618	10		11		201	191	121	20	200	-22		2011	300	- 22	12	100		200	200	191	64	199	:::			61.	11	111	111
<b> </b>			 										· · · ·			:		1.1				1		11								111
L																: 		: :						11								
1								1.1			1					1.1		1						- 1						. 1	1	- 11
+	. ;	цан. С	2-2	- i -	222	÷.,		- j	- 4 -		.;., ,	÷.,.	222		4.20	;	2.12	14	-1-1-1			$\frac{1}{2} + \frac{1}{2}$		23					;		÷	111
	1	:		÷				1	÷		÷.	÷÷			:	:	<u>,</u> 1	÷			:	: i	1	÷ 1				:		÷	1	
	1	:	: :	1	: : :	1		1	1	1	1	11			1	1	: :	11	111		:	1 1	1	11	:::			:		: :	11	11
E : : : :	::::	1111	2:12	: de	222	÷ : :		:2:::	: : :	::)::	: i: i	111	222	::::	:::::	÷ : :	1: :1:	11	:::::		::::	2:13	: de	11	111	: : :	::::		2:1:	i : i	:23	3.55
E::::		20.2	111	111	0.00	10.0		1011	2.2.2	110	10.1	2.2.2	e e e		212.2.2	111	0.00	1.2				5.5.2	121	5.2		111	111		0.1.2	111	20.2	2.25
		4.4	2.57		222	÷.,		di di serence de la construcción de		сці,	- j	S - C -	222			÷		11				2.1.5		23					2.5		-23	111
		11.1				÷ 2 ÷					- 11 -	111				<u>.</u>	200	11	- : - : - :			2.5.2		22		· · ·	• • •		5 -		12.3	3.51
		· · · ·	6 T 6	1.1	2 E E	10		16.53	- 5 -		· · · ·	5.57	e e e			111	11 A.	: :,	· · · · ·			7 T T	, -	63	••••				677		14.1	- 1 T
+ • • • •	· } · · ·	-1	} + }		233	÷		- }		· · }- ·	÷	( - ( - )	222			$\frac{1}{2}$ + $\frac{1}{2}$	e e e	14	-0-0		-{	÷(	( -	23			• • •	(	200	{ + {	- i - i	
	1	1		1	: : :	1		1	1		1	1.1			1	1	1.1	1.1	111		1	: :	1		111			:	:	: :	1.1	
	. ;	÷.	) i i	1	222	÷.		- î î î î			÷.	117	222			111	2.12	14	111		÷	115	141	11	110				211	111	111	111
	1	1	: :	1	: : :	1		1	1	1	1	11	:::			1	111	1.1	111		1	1.1	1	11	111			:	1	: :	11	
		i -	: :	1		1		÷	1	- i -	÷.	i i .	111		i	1	i i	i i	111		1	i i	- i	11	111			:	i	: :	11	: ; ; l
						!													:::													
																			:::													
			1 1  																					· · ·								
																		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·														
	-																											               				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·											
																· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·							· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																												· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
																												· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				
																													· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			
														· · · · ·																		
														· · · · ·																		
																					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·											
														·····																		
														·····																		
														·····																		
														·····																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														·····																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·													· · · ·					
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·													· · · ·					
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·													· · · ·					
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·													· · · ·					
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·													· · · ·					
														·····													· · · ·					
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·													· · · ·					
																											· · · ·					
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·													· · · ·					
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		