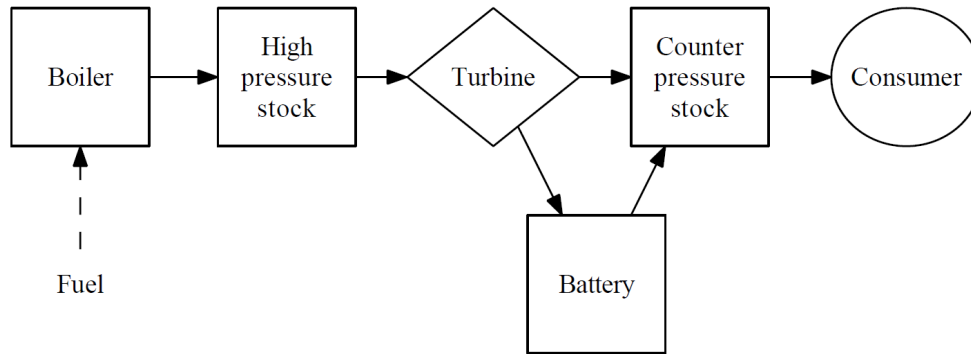


Dynaamisen järjestelmän simulointi ja säätö

1 Tausta ja lähtökohdat

Tehtävässä mallinnetaan voimalaitosta, jossa käyttämällä polttoaineena esim. turvetta, hiiltä, öljyä ja kaasuja, pystytään tuottamaan höyryä ja sähköä kuluttajille. Voimalaitoksen toimintakaavio on esitetty Kuvassa 1. Teollisuusprosesseissa käytettävien energialähteiden, höyryn ja sähkön tarpeiden määrä vaihtelee suuresti kulutuksen mukaan. Esim. paperikoneen käynnistäminen aiheuttaa höyryntarpeen voimakkaan kasvun. Jos kulutushuippuja pystytään ennakoimaan voimalaitoksella, voidaan laitoksen höyryntuotanto ajaa etukäteen ylös halvoilla polttoaineilla (turve, hiili), ja kalliiden, nopeiden säätöpolttoaineiden (öljy, kaasu) tarve vähenee. Toisaalta kulutushuippuja tasaamalla voidaan peruspolttoaineena käyttää enemmän halvempia kiinteitä polttoaineita ja suorittaa säätö kalliimpia polttoaineita (öljy) käyttäen.



Kuva 1: Toimintakaavio voimalaitoksesta. Katkoviiva kuvaa lämmitystä ja yhtenäiset viivat höyrynsiirtoa

2 Vastapainevoimalamallin kuvaus

Vastapainevoimalan ensisijaisena tarkoituksena on tuottaa kuluttajan (esim. tehdas) tarvitsema höyry. Tässä työssä ei tarkastella sähkön tuotantoa, vaan tarkastellaan ainoastaan höyryn kulutuksen ja tuotannon sovittamista toisiinsa.

Tarkastellaan vastapainelaitoksen yksinkertaistettua mallia. Polttoaineen syöttöjärjestelmän ja lämmön siirtymisen hitautta kattilassa kuvataan 1. kertaluvun dynamiikalla

$$T_1 \frac{df_p(t)}{dt} + f_p(t) = k_0 u(t), \quad (1)$$

missä

- $f_p(t)$ = kattilan höyrynkehitys
- $u(t)$ = polttoaineen syöttö
- T_1 = kattilakohtainen vakio höyryntuotannolle
- k_0 = muunnoskerroin polttoaineensyötöstä höyryntuotantoon

Kattilan paineen muutosnopeus saadaan laskettua höyrykehityksen ja kattilasta lähtevän höyryvirtauksen avulla

$$\frac{dp_k(t)}{dt} = \frac{f_p(t) - f_{ka}(t)}{T_s}, \quad (2)$$

missä

$$\begin{aligned} p_k(t) &= \text{kattilan paine} \\ f_{ka}(t) &= \text{kattilasta lähtevä höyryvirtaus} \\ T_s &= \text{kattilan koosta riippuva vakio (varastoisimiskyky)} \end{aligned}$$

Höyryn massavirtaus kattilasta höyrytুকীiin oletetaan alikriittiseksi ($p_{kp}(t)/p_k(t) \leq 0.55$), jolloin

$$f_{ka}(t) = k_1 \sqrt{p_k^2(t) - p_{kp}^2(t)}, \quad (3)$$

missä

$$\begin{aligned} p_{kp}(t) &= \text{korkeapainetukin paine} \\ k_1 &= \text{virtausvastus kattilasta höyrytুকীiin} \end{aligned}$$

Höyrytukin paineen muutosnopeus saadaan kattilasta tulevan ja höyrytukista lähtevän höyryvirtauksen avulla

$$\frac{dp_{kp}(t)}{dt} = k_2 (f_{ka}(t) - f_g(t)), \quad (4)$$

missä

$$\begin{aligned} f_g(t) &= \text{virtaus turbiiniin} \\ k_2 &= \text{korkeapainetukin varastointikyky} \end{aligned}$$

Höyrytukista turbiinille menevä virtaus on suoraan verrannollinen turbiinin säätöventtiilin säätimen ulostuloviestiin. Turbiiniin menevä höyryvirtaus riippuu toisaalta vain syöttävästä paineesta, sillä virtaus on oletettu ylikriittiseksi. Näin saadaan

$$f_g(t) = k_3 z_1(t) p_{kp}(t), \quad (5)$$

missä

$$\begin{aligned} z_1(t) &= \text{säätimen 1 ulostulosignaali} (z_1 \in [0.8, 1.2]) \\ k_3 &= \text{virtausvastus turbiinille} \end{aligned}$$

Höyryakkua ladattaessa osa turbiinivirtauksesta menee höyryakkuun. Yleensä suurin osa turbiinivirtauksesta virtaa suoraan vastapainetুকীiin. Mikäli höyryakkua puretaan, johdetaan virtaus akusta vastapainetুকীiin. Vastapainetukin paineen muutosnopeus riippuu tুকীiin tulevien ja tুকীista lähtevien virtausten erotuksesta

$$\frac{dp_{vp}(t)}{dt} = k_4 (f_g(t) + f_{out}(t) - f_{kul}(t) - f_{in}(t)), \quad (6)$$

missä

$$\begin{aligned} p_{vp}(t) &= \text{vastapainetukin paine} \\ f_{out}(t) &= \text{virtaus höyryakusta} \\ f_{in}(t) &= \text{virtaus höyryakkuun} \\ f_{kul}(t) &= \text{kulutukseen menevä höyryvirtaus} \\ k_4 &= \text{vastapainetukin varastointikyky} \end{aligned}$$

Höyryakusta oletetaan, että sitä ladataan turbiinista väliloton avulla siten, että latauspaine on vakio (13 bar). Akussa vallitseva paine on suuruusluokkaa 10 bar, joten latausvirtaus on alikriittinen. Lisäksi virtaus oletetaan suoraan verrannolliseksi latausventtiilin säätimen ulostuloviestiin. Näin saadaan

$$f_{in}(t) = k_5 z_2(t) \sqrt{13^2 - p_a^2(t)}, \quad (7)$$

missä

$$\begin{aligned} z_2(t) &= \text{säätimen 2 ulostulosignaali } (z_2 \in [0, 1]) \\ k_5 &= \text{virtausvastus höyryakkuun} \\ p_a(t) &= \text{akussa vallitseva paine} \end{aligned}$$

Virtaus höyryakusta on ylikriittinen, sillä vastapainetukin paine on n. 3 bar. Myös tätä virtausta ohjataan säätimen avulla, jolloin

$$f_{out}(t) = k_6 z_3(t) p_a(t), \quad (8)$$

missä

$$\begin{aligned} z_3(t) &= \text{säätimen 3 ulostulosignaali } (z_3 \in [0, 1]) \\ k_6 &= \text{virtausvastus höyryakusta} \end{aligned}$$

Höyryakun paineen muutosnopeus riippuu lähteivistä ja tulevista virtauksista sekä akun paineesta ja akussa olevasta veden massasta. Paineen muutosnopeudelle pätee näin ollen likimääräisesti

$$\frac{dp_a(t)}{dt} = -(h_1 p_a(t) + h_2) \frac{f_{out}(t) - f_{in}(t)}{m_a}, \quad (9)$$

missä

$$\begin{aligned} h_1 &= \text{höyryakulle ominainen vakio} \\ h_2 &= \text{höyryakulle ominainen vakio} \\ m_a &= \text{akussa olevan veden massa} \end{aligned}$$

tasapainossa virtaus akkuun f_{in} ja akusta ulos f_{out} ovat nolla.

3 Tehtävät

1. Voimalaitosta kuvaava Simulink-malli (voima.mdl) löytyy kurssin MyCourses-sivuilta. Mallin parametrit löytyvät param.m Matlab-scriptistä, joka täytyy ajaa aina ennen simulointia. Simuloinnin voi myös käynnistää Matlab-scriptin sisältä, katso esimerkki scriptin lopusta. Systemi on aluksi tasapainotilassa - tasapainoarvot löytyvät tämän työohjeen lopusta. Tutustu malliin, jotta ymmärrät miten se toimii. Selosta raportissa lyhyesti mallin toiminta.
2. Yli-innokas laitospäällikö avaa ohikulkiessaan venttiiliä z_1 sen verran, että turbiinivirtaus kasvaa 3 kg/s. Kuinka paljon venttiilin asento muuttuu, ja mikä on uusi arvo? Tutki simuloimalla, mitä tapahtuu etenkin korkeapainetukin paineelle.
3. Suuret painenvaihtelut rasittavat korkeapainetukkia ja aiheuttavat ongelmia jatkossa. Lisäksi korkeapainetukin paineen nousu yli 100 barin laukaisee laitoksen hätäpysäytyksen. Tavoitteesi on pitää korkeapainetukin poikkeamat pienempinä kuin $\pm 2\%$ tasapainoarvosta. Toisaalta nopeat polttoaineen syötön muutokset eivät ole toivottavia, sillä kallista säätöpolttoa tarvitaan, jos ohjaus sisältää amplitudiltaan yli 1 kg/s vaihteluja alle sadan sekunnin jaksonajalla. Olet siis ratkaisemassa monitavoitteista optimointiongelmaa. Ohjeeksi säätimen konstruointiin voidaan antaa, että laitoshenkilökunnan preferenssien mukaan pitkällä aikavälillä vakaa korkeapainetukin paine on säätöpolton minimointia tärkeämpää. Ryhdyt kehittämään voimalaitokseen säätöjärjestelmää, jossa polttoaineensyöttöä säädetään takaisinkytkennällä korkeapainetukin paineesta. Tuumasta toimeen: kokeile ensiksi viritää käsin (testaamalla eri arvoilla) P-säädin askelvastekokeen ($u_0 + 1\text{kg/s}$) perusteella. Mitä havaitset? Kokeile vielä säätää käsin PI- ja PID-säädintä, jotta ymmärrät eri säätimien väliset erot.

Selitä seuraavaksi miten P-, PI-, tai PID-säädin voidaan säätää käyttämällä derivaatan maksimiarvoa askelvastekokeessa (Åström & Murray, Chapter 11). Kokeile miten eri säätimet pystyvät pelastamaan tilanteen, jossa laitosmies töppää. Esitä kaikki relevantit kuvaajat (erikseen askelvastekokeelle ja laitosihihen aiheuttamalle häiriölle) ja säätimien arvot (k_p, k_i ja k_d), sekä kaavat arvojen laskemiseksi. Selitä myös miten kolmen eri säätimen tuottamat tulokset eroavat. Valitse lopuksi PID-säätimelle arvot, joita tulet jatkossa käyttämään.

4. Vaihtoehtoinen säätötapa PID-säädölle on tilatakaisinkytkentä. Voimalaitoksen yläosan tilamuuttujat ovat f_p, p_k , ja p_{kp} , ja ohjaus on lineaarinen funktio näistä tiloista. Muodosta polttoaineensyötölle tilatakaisinkytkentään perustuva säädin, jonka parametrit määrätään valitsemalla suljetun silmukan systeemin tilayhtälömatriisin ominaisarvot sopivasti. Kätevä tapa valita ominaisarvot on muodostaa lineaarisneliöllinen äärettömän aikavälin optimisäätötehtävä (ks. Kirk "Optimal Control Theory") ja ratkaista tilatakaisinkytkennän painomatriiseihin liittyvä algebrallinen Riccatin yhtälö numeerisesti (makrot "lqr" ja "lqr2" Matlabissa). (Huomaa että hyvän tuloksen hakeminen mielivaltaisella ominaisarvojen (napojen) asettelulla on aika loppumaton suo.)

Riccatin yhtälöä määrittäessä voimalaitoksen yläosan malli on linearisoitava tasapainonsa ympäristössä. Linearioitua mallia käytetään **ainoastaan** ohjauksen määrittämiseen, eli alkuperäistä yläosan mallia ei tule korvata linearisoidulla mallilla. Symboliseen laskentaan voi käyttää Mathematicaa tai jotain muuta soveltuvaa ohjelmistoa. Muista tarkistaa systeemin ohjattavuus. (Vinkki: Sen pitäisi olla). Tutki miten tilatakaisinkytkentään perustuva säädin pystyy pelastamaan tilanteen, jossa laitosmies töppää.

Kokeile eri painomatriiseja Riccatin yhtälölle. Jokaiselle kandidaatille, esitä painomatriisi, systeemin navat, vastaavat säätölait sekä kuvaajat systeemin toiminnasta. Valitse painomatriisit jotka ovat sinusta parhaiten sopivat.

5. Tilatakaisinkytkennässä tällaisenaan on ongelma. Mikä? Sen poistamiseksi lisäämme tilasäätimeen I-osan. Tarkastellaan systeemiä

$$\dot{x} = Ax + Bu \tag{10}$$

$$y = Cx, \tag{11}$$

missä u on syötemuuttuja, x tilamuuttujien vektori, ja y tulosmuuttuja. Erosuure on $e = r - y = r - Cx$, missä r on referenssisignaali. Tässä tehtävässä tutkimme vain korkeapainetukin painetta p_{kp} , ja meidän referenssisignaali on näin ollen $r = p_{kp0}$. Erosuureen integraali saadaan aikaiseksi lisäämällä systeemin tilavektoriin tila x_i ja tilayhtälö $\dot{x}_i = e = r - Cx$. Kun nyt valitaan ohjaus $u = -\tilde{K}\tilde{x} = (K \ k_i)(x \ x_i)^T$, tulee u :hun mukaan erosuureen integraali kerrottuna k_i :lla.

Muotoile laajennetut tilayhtälöt, rakenna I-osa tilasäätäjään ja hae sopiva takaisinkytkentävektori \tilde{K} samalla tavalla kuin tehtävässä 4.

6. Vertaa PID-säätöä (tehtävä 3) ja tilatakaisinkytkentään perustuvaa säätöä (tehtävä 5) toisiinsa sekä yleisesti että tässä kyseisessä tehtävässä. Jätä parempi säätämään polttoainevirtausta tehtävästä 8 eteenpäin.
7. Laajoja järjestelmiä analysoitaessa kannattaa joissain tapauksissa redusoida monimutkainen malli yksinkertaisempaan muotoon. Vaikkakaan tarkastelemamme voimalaitoksen malli ei nyky muodossakaan ole kovin monimutkainen, linearisoimme tehtävässä 4 laitoksen yläosan ensimmäisen kertaluvun järjestelmäksi. Kirjoita seuraavaksi linearisoitu tilayhtälömalli siirtofunktio muodossa ja konstruoi 1. kertaluvun Padé-approksimaatio (Norton: "An Introduction to Identification", ss. 225-227). Vertaa kuvaajan avulla yksinkertaistetun mallin antamaa korkeapainetukin paineen vastetta polttoaineensyötön muutuksessa askelmaisesti alkuperäisen mallin voima.mdl askelvasteeseen. (Askelvasteessa $u_0 + 1\text{kg/s}$, ilman säätimiä.)
8. Unohdetaan nyt Padé-approksimaatio ja siirrytään tarkastelemaan laitosta kokonaisuutena. Olet säätimelläsi saanut stabiilita korkeapainetukin paineen. Yläosa toimii loistavasti (laitosmies on sulkenut venttiiliin takaisin $z_1 = 1.0$ asentoon), mutta juuri silloin se tapahtuu... Kulutusvirtaus f_{kul} kasvaa

tasapainoarvostaan yhtäkkiä +2 kg/s. Miten vastapaine käyttäytyy? Höyryä käyttävä instanssi haluaa, että vastapaine vaihtelee korkeintaan $\pm 10\%$ tasapainoarvosta.

- Rakenna seuraavaksi vastapaineen säätöön järjestelmä, jossa vastapainetta hallitaan säätimen avulla. Kyseinen säädin ohjaa vastapaineturbiinin venttiiliä z_1 ja siten määrää turbiiniin menevän höyryvirtauksen annetuissa rajoissa. Säätimen tulee olla riittävän hidas, että höyryakun varastointikyky pysyy käyttämään hyväksi. Tarkoituksena on, että ainoastaan matalataajuiset ja suuriamplitudiset kulutushäiriöt ja pysyvänluontoiset poikkeamat korjataan korkeapainetukin ja kattilan säädön avulla. Toisaalta säätimen tulee olla riittävän nopea, jotta suurimman häiriön sattuessa vastapaine pysyy sallituissa rajoissa. Viritä turbiinin venttiilin säädin siten, että se pyrkii pitämään vastapaineen tasapainoarvon (= 3 bar) ympärillä. Kokeile P- ja PI-säätöä sekä myös pelkkää I- tai ID-säätöä. Mitä havaitset? Säädä kokeilemalla eri arvoja käsin tai Matlab-scriptin avulla. [Esitä relevantit kuvaajat.](#)
- Seuraavaksi otetaan vastapaineen säätöön mukaan höyryakku. Sillä on tarkoitus huolehtia suurempitaajuisista kulutusmuutoksista sekä pehmentää äkillisiä muutoksia niin, että kattilan polttoaineensyöttö ei sahaa. Valittu akun säätöstrategia perustuu seuraaviin P-säätimiin:

$$z_2 = k_{in}(p_{vp} - p_{vp0}) \quad (12)$$

$$z_3 = k_{out}(p_{vp0} - p_{vp})/p_a, \quad (13)$$

missä k_{in} ja k_{out} ovat vahvistuksia ja p_{vp0} on vastapainetukin paineen tasapainoarvo. Miksi on perusteltua olla käyttämättä I-säätöä? Muuta höyryakun lataus- ja purkuviestien saturoitumisrajat oikeiksi (ovat siis olleet tähän asti nollija) ja viritä säätimet. Käytä virittämisessä alkuarvoja $k_{in} = 25.5$ ja $k_{out} = 210.0$ ja hae sellaiset vahvistukset, joilla turbiinin virtauksen säätö ja höyryakun säätö toimivat yhteistyössä mahdollisimman hyvin. Voi olla hyödyllistä pohtia myös PID-säätimen taajuusvastatetta.

Mahdollistaako ehdotettu strategia akun asianmukaisen latauksen? Miten voitaisiin varmistaa, että akkua ei koskaan tyhjene kokonaan? Millaiset häiriöt soveltuvat parhaiten testaamaan akun ja vastapainesäätimen yhteistoimintaa? [Esitä relevantit kuvaajat.](#)

- Sovita eri säätimien parametrit toimimaan mahdollisimman hyvin yhteen niin, että vastapaine pysyy sallituissa rajoissa, korkeapainetukin paineenvaihtelut ovat mahdollisimman pieniä mutta toisaalta säätöpolttoaineen käyttö kattilassa minimoituu. Testaa laitoksen toiminta kokonaisuutena. Kokeile säädetyt laitoksen toimintaa erilaisilla askel- ja ramppimaisilla kulutushäiriöillä sekä taajuusominaisuuksien selvittämiseksi myös muotoa

$$f_{kul} = f_{kul0} + B \sin(\omega_1 t) + C \sin(\omega_2 t), \quad (14)$$

missä ω_1 on matala taajuus, esim. luokkaa 0.005 rad/s ja ω_2 on korkea taajuus, luokkaa 0.1 rad/s. Höyryyn kulutuksesta oletetaan, että amplitudit ovat likimäärin kääntäen verrannollisia taajuuksiin ja että 15 prosentin poikkeamaa tasapainosta voidaan pitää suurena. **Anna kokeiden perusteella yleisohje vastapainehöyryn käyttäjälle siitä, minkä amplitudiset korkea- ja matalataajuiset sekä miten suuret askelmaiset kulutushäiriöt ovat sallittuja annetulla vastapaineen vaihtelurajalla.** Muista koko ajan myös huolehtia kattilahenkilökunnan vaatimuksesta kalliin säätöpolton minimoinnista ja korkeapainetukin painevaihteluista! Oletetaan, että yli 0.2 rad/s taajuuksia ei juurikaan esiinny. [Esitä relevantit kuvaajat.](#)

4 Työselostus

Tehtävissä esitettyjen kysymyksiä vastausten lisäksi työselostuksen tulisi sisältää:

- Johdanto, jossa kerrotaan työn taustasta ja tarkoituksesta.
- Jokaisella simuloidulla häiriöllä kuva sekä säädettävän että säätävän suureen käyttäytymisestä.

- Pohdinnat, jossa kommentoidaan työssä käytettyjä menetelmiä, malleja sekä työtä kokonaisuutena. Parannusehdotuksia saa esittää.

Vakioitten arvoja:

T_1	=	30.0 kattilan höyryntuotannon aikavakio [s]
T_s	=	15.0 kattilan varastointikyky [kg/bar]
k_0	=	1.0 muunnoskerroin polttoaineensyötöstä höyryntuotantoon
k_1	=	2.0 virtausvastus kattilasta höyryrukkiin [kg/(s*bar)]
k_2	=	1/30korkeapainetukin varastointikyky [kg/bar]
k_3	=	0.4 virtausvastus turbiiniille [kg/(s*bar)]
k_4	=	1/300 vastapainetukin varastointikyky [kg/bar]
k_5	=	0.6 virtausvastus höyryakkuun [kg/(s*bar)]
k_6	=	0.6 virtausvastus höyryakusta [kg/(s*bar)]
h_1	=	8.3 höyryakulle ominainen vakio
h_2	=	21.0 höyryakulle ominainen vakio [bar]

Tasapainoarvoja:

u_0	=	35.7 polttoaineen syöttö [kg/s]
z_{1_0}	=	1.00 säätimen 1 ulostulosignaali
f_{p_0}	=	35.7 kattilan höyryntuotanto [kg/s]
p_{k_0}	=	91.0 kattilan paine [bar]
p_{kp_0}	=	89.25 korkeapainetukin paine [bar]
f_{in_0}	=	0.0 virtaus akkuun [kg/s]
f_{out_0}	=	0.0 virtaus akusta [kg/s]
p_{a_0}	=	10.0 0 akun paine [bar]
m_{a_0}	=	150 000.0 150 000.0 akussa olevan veden massa [kg]
f_{kul_0}	=	35.7 kulutusvirtaus [kg/s]
p_{vp_0}	=	3.0 vastapainetukin paine [bar]