

Petri Rautio

SYÖTTÖVESIJÄRJESTELMÄN SÄÄTIMET JA  
SYÖTTÖVESIPUMPUN KIERROSLUKUSÄÄTIMEN HUOLTO  
– SELVITYS YDINVOIMALAN PROSESSISÄÄTÖTEKNIIKAN  
TOIMINNASTA JA HUOLLOSTA

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma

2019

# SYÖTTÖVESIJÄRJESTELMÄN SÄÄTIMET JA SYÖTTÖVESIPUMPUN KIERROSLUKUSÄÄTIMEN HUOLTO – SELVITYS YDINVOIMALAN PROSESSISÄÄTÖTEKNIIKAN TOIMINNASTA JA HUOLLOSTA

Rautio, Petri  
Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Lokakuu 2019  
Sivumäärä: 47  
Liitteitä: 1

Asiasanat: säätötekniikka, säätöteoria, analogiatekniikka, prosessinohjaus

---

Opinnäytetyössä tutkittiin ydinvoimalan syöttövesijärjestelmän ja sen prosessiohjauksen toimintaa. Lisäksi työssä pohdittiin, miten järjestelmän syöttövesipumpun kohdesäätimen toimintakuntoa on mahdollista arvioida. Tämän pohjalta voidaan myöhemmin koostaa automaatiokunnossapidon käyttöön huolto- ja tarkastusohjeisto.

Opinnäytetyössä tutustutaan yleisesti Olkiluodon ydinvoimalan prosessiin sekä perehdytään syvällisemmin syöttövesijärjestelmän ohjauksen toimintaan. Pääasiallisina lähteinä on käytetty Teollisuuden Voiman koulutusmateriaaleja ja syöttövesijärjestelmän järjestelmäkaavioita sekä suomen- ja englanninkielistä säätötekniikan kirjallisuutta. Koska tutkimus kohdistuu 1970-luvulla valmistuneisiin ydinvoimaloihin, on työssä hyödynnetty säätötekniikan tutkimustietoa viideltä eri vuosikymmeneltä. Opinnäytetyö tehtiin työsuhteessa Teollisuuden Voimaan kesän ja syksyn 2019 aikana.

Opinnäytetyön teoriaosiossa käsitellään säätötekniikkaa sekä yleisimpiä säätimiä ja niiden toimintaperiaatteita. Syöttövesijärjestelmässä perehdytään kyseisen järjestelmän säätämiseen ja ohjaukseen. Viimeisessä osiossa tutkitaan toimilaitesäätimen huollon tarpeen arviointia ja sekä pohditaan miten työssä on onnistuttu.

# THE CONTROLLERS OF THE FEED WATER SYSTEM AND THE MAINTENANCE OF THE FEED WATER PUMP ACTUATOR CONTROLLER – STUDY OF THE FUNCTION OF NUCLEAR POWER PLANT PROCESS CONTROL AND MAINTENANCE

Rautio, Petri

Satakunnan ammattikorkeakoulu, Satakunta University of Applied Sciences  
Electrical and automation engineering

October 2019

Number of pages: 47

Appendices: 1

Keywords: control systems, control theory, analogue technology, process control

---

The purpose of this thesis was to study the operation of the nuclear power plant's feed-water system and its process control. In addition, the work considered how to evaluate the operational condition for the actuator controller of feed water pump. Based on this study, maintenance and inspection manuals can be compiled for the use in automation maintenance.

This study gives a general introduction to the main process of the Olkiluoto nuclear power plant and more profoundly explains the function of the feed water control system. Teollisuuden Voima training material, feed water diagrams as well as literature of control engineering in Finnish and English are used as the main sources. Since the study focuses on nuclear power plants built in the 1970s, research study in control engineering from five different decades has been used. The thesis was done during the summer and fall of 2019 while working in Teollisuuden Voima Oyj.

The theory part of the thesis deals with control technology as well as the most common controllers and their operating principles. In the next chapter, the functions of the feed water system are familiarized, and the adjustments and the controls of the system are explained. The final section of this thesis examines when and how to maintain the actuator controller and how successful this thesis was.

## LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

Venturiputki	Keskeltä kavennettu putki. Käytetään muun muassa paineeroon perustuvassa virtausmittauksessa, jossa virtaavan fluidin nopeus suurenee ja paine pienene sen kulkiessa kavennetun putken läpi.
Pikasulku	Prosessin tapahtumista johtuva, reaktoriin, turbiiniin tai höyrynkiertoon kohdistuva turvallisuusuhka. Joka vaatii reaktorin, turbiinin tai höyrynkierroksen nopean sulkemisen.
Asetusarvo	Haluttu lukuarvo, esimerkiksi pinnankorkeus tai virtausnopeus.
Oloarvo	Mitattu arvo, esimerkiksi virtausnopeus, tai pinnan korkeus.
Eroarvo	Oloarvon ja asetusarvon erotus.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tutkimuksen tavoitteet.....	6
1.2	Tutkimusaineisto.....	6
1.3	Tutkimuksen rakenne.....	7
2	TYÖN TOIMEKSIANTAJA TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ.....	8
3	YDINVOIMALAT.....	10
3.1	Ydinvoimayksiköt OL1 ja OL2 ja niiden toimintaperiaate.....	10
3.2	Ydinvoimayksikkö OL3 ja sen toimintaperiaate.....	13
4	JOHDATUS SÄÄTÖTEKNIikkaAN.....	15
4.1	Säätötekniikka osana automaatiota.....	15
4.2	Takaisinkytkentäperiaate.....	16
4.3	Säätömenetelmät.....	17
4.3.1	P-säätö (Proportional Control).....	18
4.3.2	I-säätö (Integral Control).....	19
4.3.3	PI-säätö (Proportional and Integral Control).....	20
4.3.4	D-säätö (Derivative Control).....	22
4.3.5	PD-säätö (Proportional and Derivative Control).....	22
4.3.6	PID-säätö (Proportional and Integral and Derivative Control).....	23
4.4	Säätöjärjestelmän mittauselimet ja standardiviesti.....	24
5	SYÖTTÖVESIJÄRJESTELMÄ JA SEN SÄÄTÖ.....	26
5.1	Syöttövesipumput.....	28
5.2	Syöttöveden säätöjärjestelmän tehtävät.....	28
5.2.1	Syöttövesijärjestelmän pääsäätö.....	30
5.2.2	Pikasulkusäätö.....	32
5.2.3	Matalan tehon säätö.....	33
5.3	Syöttöveden pumpun toimilaitesäädin.....	34
6	SYÖTTÖVESIPUMPUN KIERROSLUKUSÄÄTIMEN HUOLTO.....	36
6.1	Toimilaitteen kierroslukusäädin Combitrol QAQM201.....	37
6.2	Kierroslukusäätimen ja toimilaitemoottorin huollon tarpeen arviointi.....	39
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	44
	LÄHTEET.....	46
	LIITTEET	

# 1 JOHDANTO

Tässä opinnäytetyössä tutustutaan yleisesti Olkiluodon ydinvoimalan prosessiin sekä perehdytään syvällisemmin syöttövesijärjestelmän ohjauksen toimintaan. Työ tehdään suomalaiselle energiateollisuuden yritykselle Teollisuuden Voima Oyj:lle, joka tuottaa ydinvoimalla sähköä Eurajoen Olkiluodossa kohta jo kolmella ydinvoimayksiköllä. Opinnäytetyö tehtiin työsuhteessa kesän ja syksyn 2019 aikana.

## 1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia ydinvoimalan syöttövesijärjestelmän säädön toimintaa sekä perehtyä siellä käytössä oleviin säätömenetelmiin. Lisäksi työssä tutustutaan syöttövesipumpun kohdesäätimen toimintaan ja alustetaan sille mahdollisesti myöhemmin tehtävää kunnossapidon huolto-ohjetta.

Tutkimus on luonteelta kvalitatiivinen. Työssä vastataan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

1. Miten reaktorin syöttövesijärjestelmä toimii?
2. Miten syöttövesijärjestelmän kohdesäätäjää ohjataan?
3. Miten kohdesäätäjän ja toimilaitteen huollon tarpeen voi arvioida?

## 1.2 Tutkimusaineisto

Tutkimuksen kohteena ovat käynnissä olevat ydinvoimalaitokset OL1 ja OL2. Säteilyturvallisuuden vuoksi osa laitoksesta on liikkumiselta rajoitettua aluetta eli kenttä-tutkimus on tässä tapauksessa pois suljettu vaihtoehto. Koska itse kentällä olevaan järjestelmään ei ole mahdollista päästä tutustumaan, pääasiallisina tutkimuslähteinä käytetään Teollisuuden Voiman koulutusmateriaaleja, teknisiä esitteitä ja syöttövesijärjestelmän järjestelmäkaavioita.

Tutkimuksen taustana käytetään suomen- ja englanninkielistä säätötekniikan kirjallisuutta. Koska tutkimus kohdistuu 1970-luvulla valmistuneisiin ydinvoimaloihin, työssä hyödynnetään säätötekniikan tutkimustietoa viideltä eri vuosikymmeneltä.

### 1.3 Tutkimuksen rakenne

Tutkimuksen taustoittamiseksi opinnäytetyön ensimmäisissä pääluvuissa esitellään työn toimeksiantajaa, Teollisuuden Voima Oyj:tä, sekä Olkiluodossa sijaitsevien ydinvoimaloiden perustekniikkaa. Seuraavassa pääluvussa käsitellään säätötekniikkaa sekä yleisimpiä säätimiä ja niiden toimintaperiaatteita. Tämän jälkeen perehdytään tutkimuksen kohteena olevien ydinvoimaloiden syöttövesijärjestelmän säätämiseen ja ohjaukseen.

Viimeisessä osiossa tutkitaan syöttövesipumpun kierroslukusäätimen toimintaperiaatetta sekä pohditaan, miten toimilaitteen huollon tarpeen voi määrittellä.

## 2 TYÖN TOIMEKSIANTAJA TEOLLISUUDEN VOIMA OYJ

Teollisuuden Voima Oyj perustettiin vuonna 1969 ja vuonna 1974 aloitettiin ensimmäisen ydinvoimalaitosyksikön rakentaminen Eurajoella sijaitsevaan Olkiluotoon (TVO 2014). Olkiluodon ensimmäinen yksikkö OL1 valmistui 1978 ja aloitti kaupallisen tuotannon valtakunnanverkkoon syyskuussa 1979. Olkiluotoon valmistui pari vuotta myöhemmin myös toinen yksikkö OL2, joka aloitti sähköntuotannon helmikuussa 1980. Käyttöönottoa vaille valmis OL3 on yhtiön kolmas ydinvoimayksikkö, jonka sähköntuotanto on tarkoitus aloittaa vuonna 2020. (TVO 2019a.) Kolmannen laitoksen valmistuttua kasvaa Teollisuuden Voiman tuottaman sähköntuotannon osuus kolmannekseen Suomessa käytettävästä sähköstä (TVO 2019b). Teollisuuden Voima omistaa myös 45 prosentin osuuden Meri-Porissa sijaitsevasta hiilivoimalaitoksesta (TVO 2019a).

Teollisuuden Voiman suurin omistaja on Pohjolan Voima Oyj 58,5 prosentin omistusosuudella. Loput 41,5 prosenttia yhtiöstä omistavat Fortum Power and Heat Oy, Kemira Oyj, EPV Energia Oy, Loiste Holding Oy ja Oy Mankala Ab. Omistusosuudet jaotellaan kolmeen eri osakesarjaan. Näiden sarjojen osakkeet oikeuttavat eri ydinvoimalaitosyksikön sekä Meri-Porin hiilivoimalan tuottamaan sähköön. A-sarja oikeuttaa Olkiluoto 1:n ja Olkiluoto 2:n sähköön, B-sarja Olkiluodon uuden laitoksen Olkiluoto 3:n sähköön ja C-sarja Meri-Porin hiilivoimalan sähköön. (TVO 2019b.)

Taulukko 1. Teollisuuden Voiman omistajat ja osuudet (TVO 2019b).

	A-sarja (OL1 ja OL2)	B-sarja (OL3)	C-sarja (Meri-Pori)	Osuudet TVO:sta
EPV Energia Oy	6,6 %	6,6 %	-	6,4 %
Fortum Power & Heat Oy	26,6 %	25,0 %	100,0 %	27,6 %
Loiste Holding Oy	0,1 %	0,1 %	-	0,1 %
Kemira Oyj	1,9 %	-	-	0,9 %
Oy Mankala Ab	8,1 %	8,1 %	-	7,9 %
Pohjolan Voima Oyj	56,8 %	60,2 %	-	57,1 %
Yhteensä	100,1* %	100 %	100 %	100 %



Posiva Oy ja TVO Nuclear Services Oy ovat Teollisuuden Voiman tytäryhtiöitä. TVONS – TVO Nuclear Services tarjoaa ydinvoimaan liittyvää osaamistaan konsultaatio ja kehityspalvelujen muodossa asiakkaille käyttäen Teollisuuden Voiman omia asiantuntijoita. (TVO 2019c.)

Posiva Oy on ydinjätteen loppusijoitukseen erikoistunut asiantuntijaorganisaatio, joka vastaa omistajiensa ydinpolttoaineen loppusijoituksesta, tutkimuksista sekä muista asiantuntijatehtävistä. Posivan omistavat Teollisuuden Voima Oyj 60 prosentin osuudella sekä Fortum Power & Heat Oy 40 prosentin osuudella. (Posiva 2019.)

### 3 YDINVOIMALAT

Ydinvoimaloiden toimintaperiaate reaktorityypistä riippumatta on veden keittäminen. Käytännössä joko primääripiirin tai sekundääripiirin vesi höyrystetään, tämän jälkeen kuuma höyry ohjataan turbiiniin ja laajeneva höyry pyörittää siihen kytkettyä sähkögeneraattoria. Turbiinilta höyry etenee lauhduttimiin, jossa vesi jäähdytetään takaisin nestemäiseen muotoon. Lauhduttimelta vesi jatkaa voimalaitostyyppistä riippuen takaisin kuumennettavaksi reaktoriin tai höyrystimeen. Ydinvoimalaitoksen ero muihin termisiin voimalaitoksiin on ainoastaan siinä, että vettä höyrystävä energia saadaan ydinreaktioista.

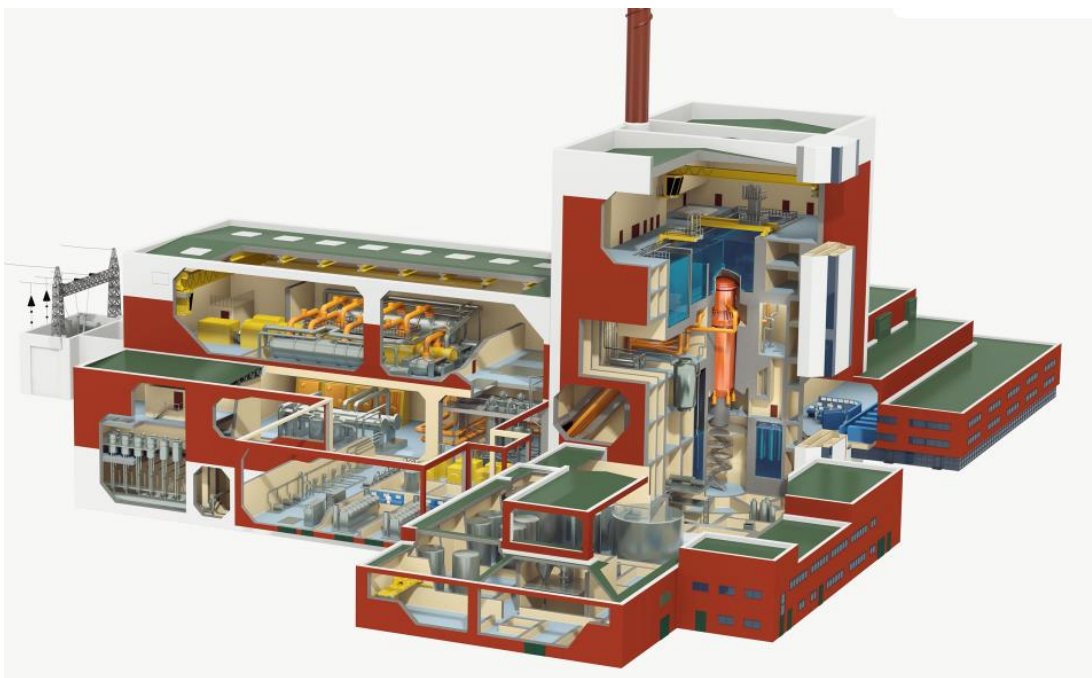
Atomitason halkeamisreaktiossa eli fissiossa polttoaineatomi halkeaa kahteen osaan ja samalla vapautuu suuri määrä lämpöä. Tämä on jatkuva ketjureaktio, jossa yksi atomin halkeaminen aiheuttaa keskimäärin yhden uuden atomin halkeamisen. (Fennovoima 2019.) Reaktiota hallitaan ja tehoa kontrolloidaan säätösauvoilla, jotka vaimentavat ja neutraloivat sydämessä tapahtuvaa reaktiota (TVO 2013, 20).

Ydinvoimalaitoksia on pääasiassa kahden tyyppisiä: kiehutusvesireaktoreita ja painevesireaktoreita. Olkiluodossa on käytössä kaksi kiehutusvesireaktoria sekä käyttöönottoa vaille valmis painevesireaktori. Kummatkin näistä ovat niin sanottuja kevytvesireaktoreita, eli niiden hidastimena sekä jäähdytysaineena toimii tavallinen puhdistettu vesi. (Fennovoima 2019.) Vedestä on puhdistettu suola ja muut epäpuhtaudet, koska suolan ja muiden epäpuhtauksien reagoitessa ionisoivaan säteilyyn saattavat ne muuttua korkea-aktiivisiksi eri aineiden isotoopeiksi (TVO 2019d).

#### 3.1 Ydinvoimayksiköt OL1 ja OL2 ja niiden toimintaperiaate

Eurajoen Olkiluodossa sijaitsee kaksi käynnissä olevaa ydinvoimalaitosta, jotka kummatkin ovat kiehutusvesireaktioteknikalla toimivia täysin samanlaisia laitossyksiköitä. Yksittäisen laitoksen nettosähköteho on nykyisin 890 megawattia. Laitokset toimitti Teollisuuden Voimalle Ruotsalainen ASEA ATOM, joka rakensi OL1-laitoksen avaimet käteen -periaatteella. OL2-laitoksen TVO rakensi itse. (TVO 2013, 9.)

Laitosrakennuskompleksin halkileikkaus on nähtävissä kuvassa yksi. Rakennuskompleksi muodostuu reaktorirakennuksesta sekä turbiini-, apu-, valvomo-, jäte-, ja toimistorakennuksista. Laitosrakennuskompleksiin lukeutuvat myös merivesi-, kytkinlaitos sekä päämuuntaja ja käynnistysmuuntajat. (TVO 2013, 12–13.)

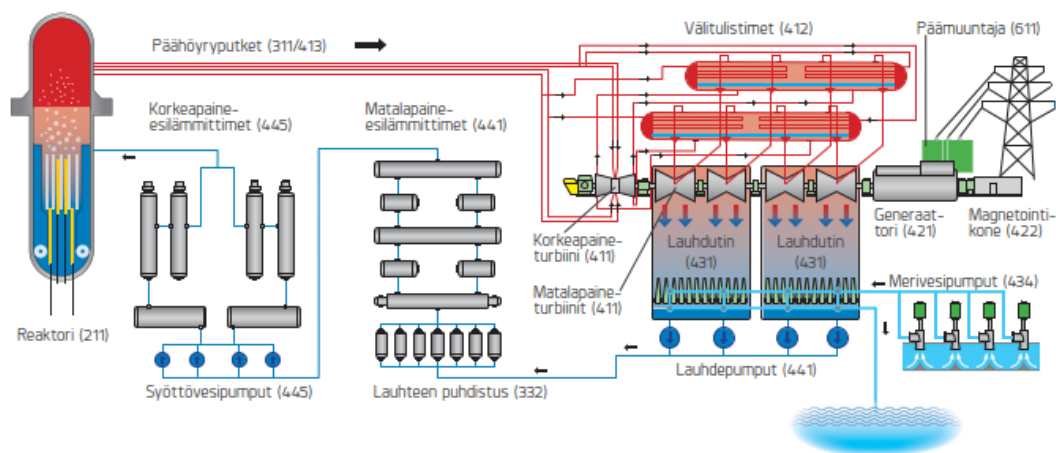


Kuva 1. Ydinvoimalayksikön OL1/OL2 halkileikkaus (TVO 2019a).

Laitosrakennuskompleksin korkein rakennus on reaktorirakennus, jonka sisällä on reaktorin suojarakennus. Reaktori sijaitsee suojarakennuksen sisällä. Reaktorirakennuksen yläosassa on reaktorihalli, jossa on reaktoriallas, käytetyn ja uuden polttoaineen altaat, reaktorin sisäosien säilytysaltaat polttoaineen vaihtoon tarvittava polttoaineen siirtokone sekä hallinosturi. Turbiinirakennus on matalampi ja pidempi rakennus. Siellä sijaitsevat korkea- ja matalapaineturbiinit, generaattori, magnetointikone ja lauhduttimet. Korkeapaineturbiineja on yksi ja matalapaineturbiineja neljä. (TVO 2013, 12–13.)

Kummatkin toiminnassa olevat laitokset ovat BWR (Boiling Water Reactor) -tyyppiä eli kiehutusvesireaktoreita, joissa vettä kierrätetään reaktorisydämen polttoainepipujen välitse, jolloin vesi kuumenee ja höyrystyy. Reaktorin tehoa säädetään säätösauvoilla ja pääkiertopumpuilla. Reaktorissa muodostuu höyryä, joka johdetaan neljää päänhöyrylinjaa pitkin korkeapaineturbiinille. Korkeapaineturbiinilla höyry luovuttaa

suurimman osan energiastaan, minkä jälkeen höyry johdetaan välitulistimelle. Tulistimella höyry kuivataan ja tulistetaan, minkä jälkeen se johdetaan matalapaineturbiineille. Turbiinit pyörittävät samalle akselille kytkettyä generaattoria, joka tuottaa sähköä valtakunnan kantaverkkoon (ks. kuva 2). (TVO 2013, 9.)



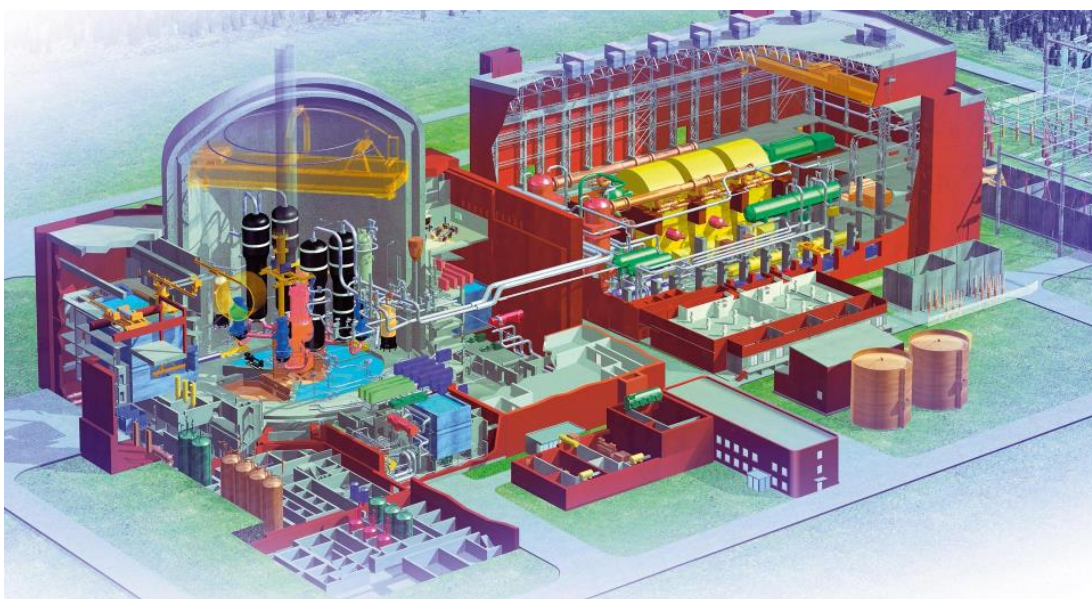
Kuva 2. OL1-/OL2-laitosyksikön virtauskaavio (TVO 2013, 9).

Matalapaineturbiineilta tuleva höyry lauhdutetaan vedeksi lauhduttimessa merivesijähdytyspiirin avulla. Syntynyt lauhdevesi pumpataan lauhdepumpuilla puhdistusjärjestelmän ja lauhteen esilämmittimien kautta syöttövesipumpuille, jotka pumpaavat sen syöttövetenä esilämmittimien kautta takaisin reaktoriin. (TVO 2013, 9.)

Kiehutusvesireaktorin ongelmaksi voi muodostua säteilevä prosessivesi. Prosessivesi pumpataan reaktorin läpi, jolloin vesi muuttuu höyryksi, joka johdetaan päähöyryputkien läpi korkeapaineturbiinille. Prosessiveden virtauksen mukana säteily leviää ympäri laitosyksikköä. Jos prosessiveden sekaan pääsisi likaa tai muita vieraita kappaleita, voisivat ne aiheuttaa polttoainesauvojen vaurioitumisen. Polttoainesauvojen vauriot voivat vastaavasti aiheuttaa säteilytason nousun koko laitoksella. Olkiluotoon valmistuneella ja pian käyttöön otettavalla OL3-laitoksella tätä ongelmaa ei ole, koska prosessivesi kiertää vain primääripiirissä (ks. luku 2.2).

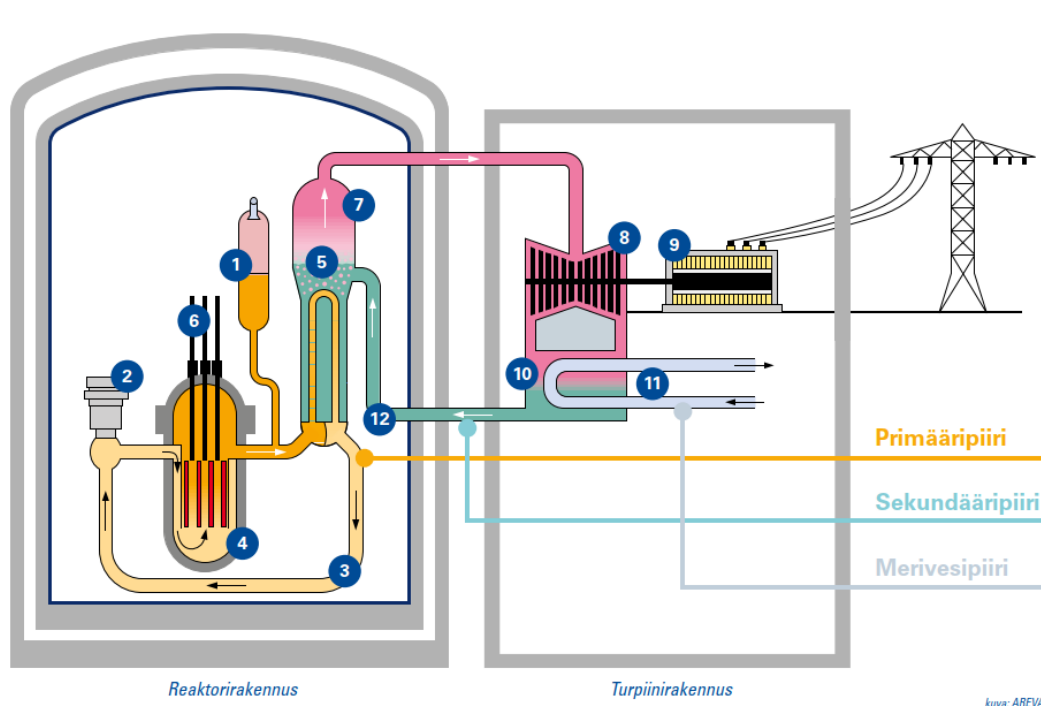
### 3.2 Ydinvoimayksikkö OL3 ja sen toimintaperiaate

OL3 on Teollisuuden Voiman avaimet käteen -periaatteella tilaama ydinvoimalaitos, jonka laitostoimittajana ovat AREVA GmbH, AREVA NP SAS ja Siemens AG. Laitos on ollut valmiina jo 10 vuotta, mutta käyttöönotto on viivästynyt vuosia. Uuden aikataulun mukaan laitoksen on tarkoitus aloittaa sähköntuotanto vuonna 2020. Laitos on EPR (European Pressurized Water Reactor) -tyyppinen eli eurooppalainen painevesi-reaktori. (TVO, 2019a.)



Kuva 3. OL3-laitosyksikön halkileikkaus (TVO 2019a).

OL3 on painevesilaitostyyppinen voimala, ja sen toimintaperiaate on huomattavasti Olkiluodon vanhempia voimaloita (OL1 ja OL2) turvallisempi, sillä säteilevä prosessivesi ei pääse leviämään reaktorirakennuksen ulkopuolelle, sillä pääprosessi muodostuu erillisistä primääri-, sekundääri- ja merivesipiireistä. Primääri- ja sekundääripiirin vedet eivät ole kosketuksissa toisiinsa, mikä näkyy myös kuvasta 4.



Kuva 4. Olkiluoto 3:n prosessikuvaus. Kuvassa on numeroituna paineistin (1), pääkiertopumppu (2), primääripiiri (3), reaktori (4), sekundääripiiri (5), säätöelimet (6), höyrystin (7), turbiini (8), generaattori (9), lauhdutin (10), merivesi (11), syöttövesipumput (12). (TVO 2009, 10.)

Primääripiirin kuumen prosessiveden avulla höyrystin (7) muuttaa sekundääripiirin veden höyryksi. Primääripiirin vesi virtaa reaktorin läpi, josta kuumentunut vesi virtaa höyrystimeen ja sieltä takaisin reaktoriin. Paineistimen (1) tehtävänä on pitää reaktorin paine riittävän korkeana, jottei primääripiirin prosessivesi ala kiehua. Höyrystimestä virtaava höyry pyörittää turbiinia (8), joka pyörittää generaattoria (9) tuottaen sähköä valtakunnan verkkoon. (TVO 2009, 10–11.)

## 4 JOHDATUS SÄÄTÖTEKNIikkaAN

Elinympäristössämme on lukuisia ohjaus- ja säätötekniikkaan perustuvia laitteita, järjestelmiä ja prosesseja. Käytännössä nämä laitteet, järjestelmät ja prosessit sisältävät toimilaitteita, joita ohjataan säätimien avulla. Toimilaite voi olla esimerkiksi venttiili, jolla säädetään virtaamaa putkistossa tai pumppu, jolla vettä pumpataan putkia pitkin säiliöön. Muita tyypillisiä toimilaitteita ovat servot, hydraulisylinterit ja moottorit.

Jos säätötekniikka ei toimi, onnettomuuksien riski kasvaa. Esimerkiksi lentokoneiden toiminta tukeutuu lukuisten tietokoneiden ja säätöpiirien varaan. Lentokone lentää ja tarvittaessa myös laskeutuu automaattisesti ilman ohjaajan vaikutusta. Riittää, että ohjaaja on ohjelmoinut reitin ja määränpään, joita pitkin se lentää ja laskeutuu inertia-suunnistuksen tai satelliittipaikannuksen avulla. Lennonohjaustietokone antaa autopilotille sekä moottoreiden tehoyksikölle käskyjä säätää lentokoneen ohjainpintoja ja tehoa, jotta haluttu paikka, nopeus tai lentotila saavutetaan. Ohjaajan tehtäväksi jää vain valvoa järjestelmän toimintaa ja olla valmiina siirtymään käsiohjaukseen, jos jotain ennalta arvaamatonta tapahtuu, tai jos järjestelmässä ilmenee vika. Sama pätee myös teollisuuden prosessiohjaukseen. (Jansson 2000, 6.)

Lentokoneissa säädön kohteina ovat muun muassa sivu- ja korkeusperäsien ja siivekkeiden asennot, polttoaineen syöttö sekä matkustamon lämpötila ja ilmanpaine. Koska suurten ladonovien kokoisten ohjainpintojen asennon muuttamiseen tarvitaan ilman virtauksen vuoksi paljon voimaa, ohjaa sitä hydraulinen sylinteri, eli toisin sanoen toimilaite. Lentokoneissa järjestelmiä voi olla kahdennettu tai kolmennettu, myös ydinvoimalassa järjestelmät ovat redundanttisia, jolloin yhden järjestelmän vikaantuminen ei aiheuta kovin vakavaa vaaraa. (Jansson 2000, 6.)

### 4.1 Säätötekniikka osana automaatiota

Säätötekniikka muodostaa merkittävän osan automaation laajasta kokonaisuudesta, mutta toisaalta kaikki säätötekniikka ei liity automaatioon. Säätötekniikan avulla voidaan ohjata esimerkiksi teollisuuden automatisoituja prosesseja mutta toisaalta myös manuaalisia laitteita. Tässä yhteydessä säätötekniikalla tarkoitetaan kuitenkin sellaisia

tilanteita, joissa säädöt perustuvat menetelmiin, jotka on määrätty toimimaan automaattisesti. (Savolainen & Vaittinen 2007, 7.)

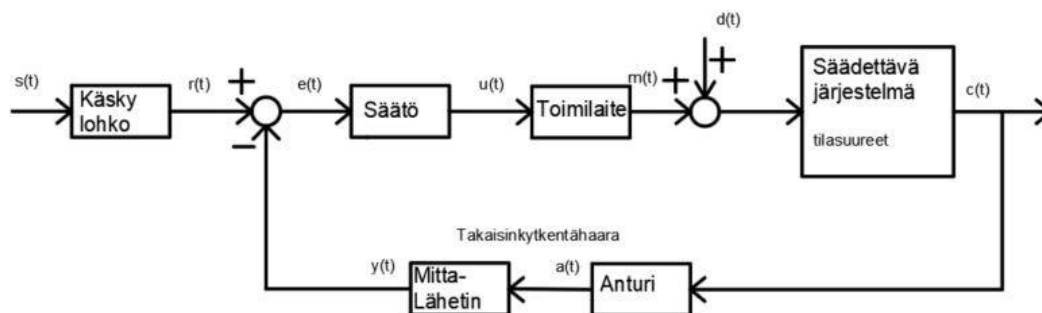
Kaikessa säätämässä on oikeastaan kyse mittaamisesta: siinä mitta-arvoja verrataan ohjeellisiin arvoihin. Yksinkertaisimmillaan mittaaminen voi tapahtua silmämääräisesti mutta toisaalta hyvinkin monimutkaisen mittauslaitteiston avulla. Näiden mitattujen arvojen eroavuuden perusteella määritellään tarvittavat ohjaustoimenpiteet. Sääntötekniikkaa käytetään tällaiseen mittausten avulla tapahtuvaan ohjaamiseen. (Savolainen & Vaittinen 2007, 7.)

Kun tuotantotekniikka kehittyy koko ajan yhä ekologisemmaksi ja tehokkaammaksi, sääntötekniikan merkitys kasvaa entisestään. Tarkan mittaustekniikan kehittymisen ansiosta sääntötekniikkaa voidaan hyödyntää samanaikaisesti yhä useamman prosessin tai laitteen täsmälliseen ohjaamiseen. Automaatiojärjestelmien suunnittelussa ja käytössä onkin tärkeää ymmärtää erilaisten takaisinkytkentäperiaatteiden ja säätömenetelmien merkitys. (Savolainen & Vaittinen 2007, 7.)

#### 4.2 Takaisinkytkentäperiaate

Monet säätömenetelmät perustuvat takaisinkytkentäperiaatteeseen. Takaisinkytkentäperiaatteella tarkoitetaan, että säädin jatkuvasti mittaamalla tunnustelee järjestelmän säätösuureen muutoksia. Esimerkiksi huoneen lämpötilaa säädettäessä huoneesta mittaamalla saatu säätösuure eli tässä tapauksessa lämpötilan oloarvo tuodaan takaisinkytkettynä mittasignaalinä eroelimelle, jota kutsutaan myös summaimeksi. Eroelimessä saatu mittaussignaali vähennetään vertailusuureesta, johon huoneen lämpötila halutaan nostaa tai laskea. Näin säätölohko muodostaa saamastaan erosuureesta eli säätöpoikkeamasta ohjaussuureen vietäväksi toimilaitteelle, esimerkiksi venttiilille, joka aukeaa ja päästää lämmintä vettä kiertämään pattereissa. (ks. kuva 5).





Kuva 5. Suljetun ja takaisinkytketyn säätöpiirin periaate. ohjearvo  $s(t)$ , vertailusuure  $r(t)$ , erosuure  $e(t)$ , ohjaus  $u(t)$ , toimitus  $m(t)$ , häiriö  $d(t)$ , säätösuure  $c(t)$ , anturi-suure  $a(t)$ , mittasuure  $y(t)$  (Savolainen & Vaitinen 2007, 13).

Takaisinkytketyssä järjestelmässä on jokin prosessi, jonka toiminta riippuu yhdestä tai useammasta muuttujasta eli tulosta. Tulosten arvo vaikuttaa aina jollain tavalla muihin prosessin muuttujiin. Jos tuloa voidaan muuttaa, sitä kutsutaan ohjaukseksi eli ohjaussuureksi, muussa tapauksessa sitä kutsutaan häiriösuureksi. (Özbay 1999, 1.)

Prosessissa olevia muuttujia seurataan, ja näitä kutsutaan prosessin tilasuureiksi. Takaisinkytketty säätöjärjestelmä kerää tietoa prosessin käyttäytymisestä seuraamalla tilasuureita ja tämän jälkeen tarvittaessa muodostaa uusia ohjaussuureita saadakseen järjestelmän toimimaan halutusti. (Özbay 1999, 1.)

Säätimen prosessinohjaukseen tekemät päätökset ovat kriittisiä. Joissain tapauksissa ne voivat johtaa järjestelmän prosessin toiminnan parantamisen sijaan täydelliseen katastrofiin. Edellä mainittujen syiden takia takaisinkytketty säätöjärjestelmä on suunniteltava huolellisesti, eli toisin sanoen säätöjärjestelmän automaattisesti toteuttamat säännöt on määriteltävä tarkkaan. (Özbay 1999, 1.)

#### 4.3 Säätömenetelmät

Säätömenetelmällä tarkoitetaan, että säädin sisältää jonkin matemaattisen toiminnon, jolla muutetaan toimilaitteen ohjausta, niin että säädettävä suure pysyisi annetuissa arvoissa. Säätötoimintoja on käytössä kolme: suhteellinen säätö eli P-toiminto, integroiva säätö eli I-toiminto ja derivoiva säätö eli D-toiminto. Toimintoja yhdistelemällä saadaan kolme perusalgoritmia P-, PI- ja PID-säätimet, joilla prosessia säädetään.

Edellä mainituista valitaan aina sopivin algoritmi prosessin lähtötietojen ja mahdollisen kokemuksen perusteella.

#### 4.3.1 P-säätö (Proportional Control)

Proportionaali- eli P-säätö on PI- ja PID- säädön perusta ja samalla yksinkertaisin säätötapa. Sana proportionaali tarkoittaa suhteellista eli verrannollista säätöä. Säätöjärjestelmässä, joka sisältää takaisinkytkennän, P-säätö muuttaa toimilaitteen ohjausviestiä suoraan verrannollisena asetusarvon ja mitta-arvon väliseen eroisuureeseen. Alla on esitetty P-säädön matemaattinen kaava 1.

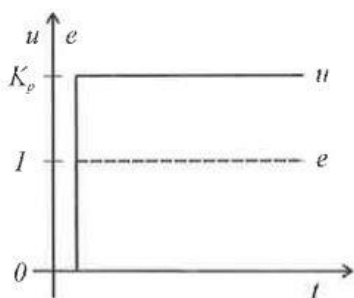
$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

$u(t)$  = ohjaussignaalin arvo (esimerkiksi mA) ajanhetkellä  $t$

$K_p$  = vahvistuskerroin

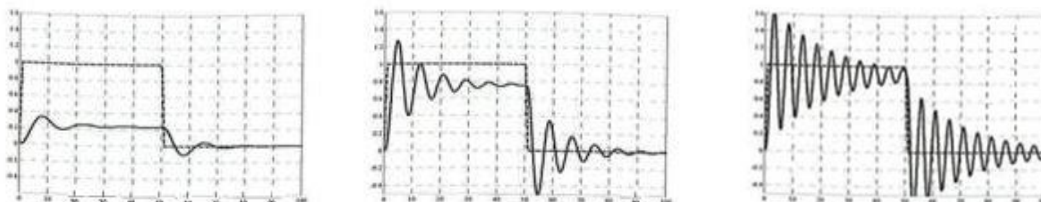
$e(t)$  = erofunktion arvo ajanhetkellä  $t$

Lähtevä ohjaussignaali ( $u$ ) on suoraan verrannollisesti riippuvainen asetusarvon ja mitta-arvon välisestä eroisuureesta ( $e$ ), joka kerrotaan vielä vahvistuskertoimella  $K_p$ . Vahvistuskertoimella on suoraan vaikutus säädön nopeuteen ja myös sen stabiiliuteen. Esimerkiksi, jos P-säätimen eroisuure muuttuisi askelfunktiomaisesti nolosta ykköseksi, saataisiin ohjaussuureeksi vahvistuksen  $K_p$  suuruinen signaali eli  $u = K_p * e$ . Kuvasta 6 nähdäänkin, että säädin ei sisällä ajan suhteen muuttuvaa suuretta. Ohjaussuure pysyy siis vakiona, ellei eroisuure ( $e$ ) muutu. P-säädin joko vahvistaa tai vaimentaa (jos  $K_p < 1$ ) eroisuureta. (Hietalahti 2012, 120.)



Kuva 6. P-säätimen askelvastekoe avoimessa säätimessä. Eroisuure ( $e$ ) on yksikköaskelfunktio, joka vahvistuskertoimen  $K_p$  vahvistamana antaa ohjaussuureen ( $u$ ). (Hietalahti 2012, 120.)

Kuvasta 7 nähdään, miten vahvistuskerrointa muuttamalla saadaan ohjearvon ja oloarvon poikkeama pienentymään, mutta samalla prosessin ulostulon  $(y)t$  värähtely kasvaa voimakkaasti. Säädin siis sahaa jatkuvasti ja oloarvo ei koskaan tule saavuttamaan ohjearvoa, vaan oloarvoon jää lopulta pieni poikkeama. (Hietalahti 2012, 120)



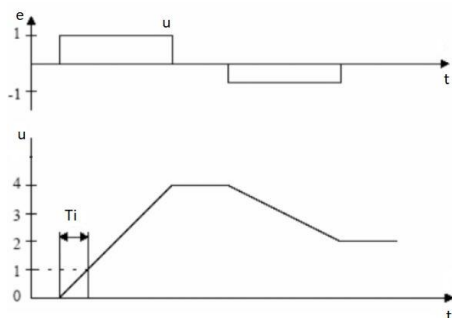
Kuva 7. P-säätimen oloarvon käyttäytyminen askelvastekokeessa. Säätimen vahvistus  $K_p$  vasemmalla on 0.5, keskellä 5 ja oikealla 15. Ohjearvon muutos katkoviivalla ja oloarvo yhtenäisellä viivalla. (Hietalahti 2012, 121)

P-säädin tunnistaa erosuureen suunnan ja suuruuden, ja säätö jättää säädettyyn suureen kuormituksen mukaisen pysyvän säätöpoikkeaman. Pysyvää säätöpoikkeamaa voidaan pienentää vahvistuskerrointa kasvattamalla, mutta samalla säätöpiiristä tulee herkempi värähtelylle. Suhteellinen P-säätö on siis toimiva säätömuoto silloin kun säätötapahtumasta halutaan rauhallinen ja siinä voidaan sallia vähäinen pysyvän tilan poikkeama. (Hietalahti 2012, 121.)

#### 4.3.2 I-säätö (Integral Control)

I-säätimen saadessa yksikköaskeleen suuruisen erosuureen alkaa ohjaussuure integroida eli laskemaan erosuureen pinta-alaa. Ohjaussuure siis muuttuu suoraviivaisesti vakionopeudella, jos erosuure säilyy vakiona. Erosuureen poistuessa jää ohjaussuure säilyttämään arvoaan, kunnes muodostuu negatiivinen erosuure. Tällöin ohjaussuure alkaa pienentyä vakionopeudella, kunnes erosuure on poistunut.

Kuvasta 8 voidaan määritellä integrointi-aika  $T_i$  seuraavasti: Avoimessa piirissä olevaan I-säätimeen tuodaan erosuureen yksikköaskelfunktio. Heti kun ohjaussuure ( $u$ ) on muuttunut ykkösen verran eli erosuureen verran, on integrointi-aika  $T_i$  kulunut.



Kuva 8. I-säätimen käyttäytyminen askelvastekokeessa (Hietalahti 2012, 122).

Käytännössä I-säädintyyppiä ei yksinään esiinny, vaan sitä käytetään P-säädön kanssa. I-säädössä toimilaitetta ei ole sidottu erosuureeseen samoin kuin P-säätimessä. Tällöin erosuureen esiintyessä, ajaa ohjaussuure toimilaitetta jatkuvasti erosuuretta ( $e$ ) pienentävään suuntaan. I-säätö ei siis jätä säädettävään suureen pysyvää poikkeamaa.

#### 4.3.3 PI-säätö (Proportional and Integral Control)

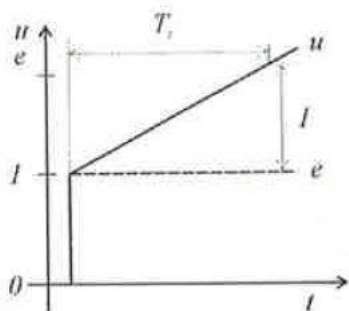
Kun suhteelliseen säätöön (P) otetaan mukaan integroiva (I) toiminto, jonka tarkoitus on tuottaa viivästetty ohjausviesti, muuttuu se säädintä harkitsevammaksi. PI-säätö yksinkertaisesti sanottuna ottaa huomioon prosessihistorian, eli aiemmin tapahtuneet muutokset huomioidaan ohjausviestissä. Tekijänä toimiva aikaintegraali nimensä mukaan integroi virhettä valitulla integrointiajalla.

PI-säätimessä toimitukseen lauseke käsittää siis kaksi termiä: erosuureeseen verrannollisen suhdetermin (P) ja aikaintegraaliin verrannollisen integroivan termin (I).  $T_i$  on säätimen integrointiaika. Jos se on viritetty varovasti, eli aikaa on paljon, toimii säädin alussa P-säätimen tapaan. Vasta aivan lopussa alkaa integrointivaikutus näkyä säädettävässä suuressa muuttaen sitä niin kauan, että erosuure pienenee nolnaan. PI-säädössä ei jää pysyvää säätöpoikkeamaa säädettävään suureen. Jos integrointiaikaa pienennetään, näkyvät P- ja I-toimintojen vaikutukset välittömästi. Järjestelmä reagoi nyt nopeasti, mutta saattaa värähdellä aluksi voimakkaasti. (Hietalahti 2012, 122–123.)

PI-säädin muodostuu kahdesta parametrilla jolloin ohjausarvo voidaan laskea kaavan 2 avulla.

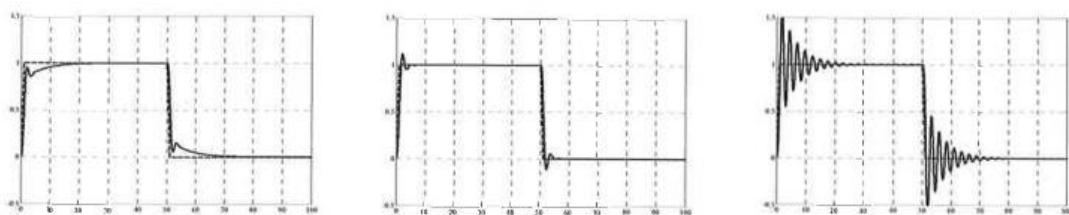
$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^{t_1} e(\tau) d\tau \right) \quad (2)$$

Kuvassa 9 säätimen vahvistus  $K$  on yksi ja kun eroosuureksi yksikköaskelfunktio ( $e$ ), nousee ohjaussuure ( $u$ ) heti P-toiminnon vaikutuksesta samaan arvoon, eli yhteen. Samaan aikaan alkaa I-toiminto muuttaa ohjaussuuretta integrointiajaksi  $T_i$  säädetyllä nopeudella, kunnes ohjaussuure ( $u$ ) saavuttaa oman rakenteellisen maksiarvonsa. (Hietalahti 2012, 123.)



Kuva 9. PI-säätimen käyttäytyminen avoimen piirin askelvastekokeessa (Hietalahti 2012, 122).

Kuvassa 10 näkyy, kuinka integroimisajan muuttaminen vaikuttaa PI-säädön käyttäytymiseen. Säätimen vahvistus on pidetty kaikissa tilanteissa samana. Vasemmalla on pitkä integrointiaika (1 s), jolloin säädin korjaa poikkeaman melko hitaasti. Keskellä integrointiaikaa on lyhennetty (0.3 s), jolloin säädin saadaan korjaamaan poikkeama nopeammin. Oikealla integrointiaikaa on lyhennetty liikaa (0.08 s), jolloin piiri alkaa värähdellä voimakkaasti. (Hietalahti 2012, 123.)



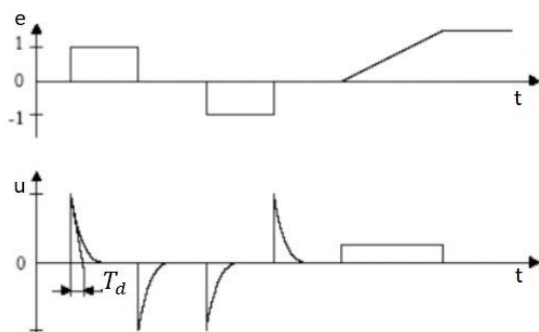
Kuva 10. PI-säätimen käyttäytyminen, kun integroimisaikaa muutetaan (Hietalahti 2012, 123).

#### 4.3.4 D-säätö (Derivative Control)

D-säätöä eli ennakoivaa säätöä ei koskaan käytetä itsenäisenä säätömuotona, vaan aina vähintään P-säädön kanssa yhdessä. D-säädön ohjaussuuren arvo on riippuvainen erosuuren muutosnopeudesta ja derivointiajasta. D-säädön ohjaussuuren käyttäytyminen yksikköaskel- ja pengerkäyrässä näkyy kuvassa 11.

Erosuuren ollessa yksikköaskelfunktio, D-säätimen ohjaussuure reagoi erosuureen ( $e$ ) muutokseen erittäin nopeasti nostamalla ohjaussuuren ( $u$ ) välittömästi rakenteelliseen maksimiin. Maksimista ohjaussuure palautuu nollaan derivointiajan  $T_d$  määräämän aikavakioikäyrän mukaisesti. Mitä pienempi derivointiaika on, sitä nopeammin ohjaus menee nollaan.

Sen sijaan, kun erosuure muuttuu pengerkäyräksi, eli niin sanottuna aikaramppifunktiona, D-säätimen ohjaukselle muodostuu arvo, joka pysyy samana niin kauan kuin pengerkäyrä jatkaa kasvamista. Pengerkäyrän saavuttaessa huippunsa erosuure ei enää muutu, jolloin D-säätimen ohjausarvo putoaa nollaan.

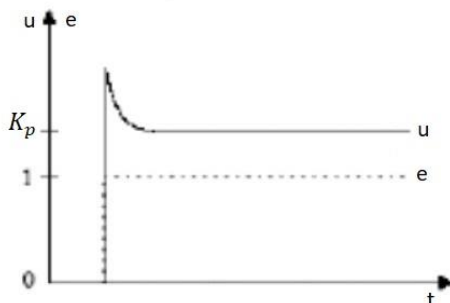


Kuva 11. Askel- ja pengerkäyrän vaikutus D-säädön käyttäytymiseen (Hietalahti 2012, 124).

#### 4.3.5 PD-säätö (Proportional and Derivative Control)

PD-säätö on P- ja D-toiminnon yhdistelmä. Kuvassa 12 askelmaisen erosuuren muodostuessa hyppää ohjaussuure rakenteelliseen maksimiin ja palaa derivointiajan määräämän ajan kuluttua vahvistuksen  $K_p$  määräämään arvoon. PD-säätöä ei juurikaan

käytetään säätömuotona ja se toimiikin vain parhaiten tilanteissa, joissa ei ole kuollutta aikaa. PD-säätöä käytetään yleensä yhdessä integrointitoiminnon kanssa (PID).



Kuva 12. PD-säätö askelvastekokeessa (Hietalahti 2012, 124).

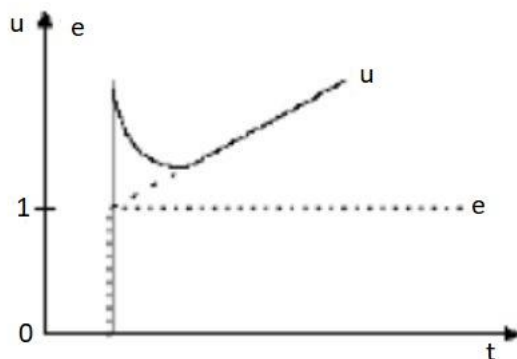
#### 4.3.6 PID-säätö (Proportional and Integral and Derivative Control)

PID-säätö on säätöratkaisu, jossa säädön on reagoitava nopeasti säätöpoikkeaman muuttumisnopeuteen. PID-säätimellä on PI-toimintojen lisäksi myös derivoiva termi, eli säädin ottaa huomioon myös erosuureen muuttumisnopeuden. Toisin sanoen se yrittää ennakoida sitä, mihin prosessin oloarvo on menossa. Ennakoinnin ansiosta PID-säädin voi reagoida nopeammin kuin PI-säädin. Jos positiivinen erosuure kasvaa, vahvistaa derivoiva toiminto suhteellisen ja integroivan toiminnon vaikutusta. Jos taas erosuure on pienentymässä, heikentää derivoiva toiminto suhteellisen ja integroivan toiminnon vaikutusta. D-toiminto auttaa tilanteissa, joissa itse mittausjärjestelmä on aikavakioltaan hidas verrattuna säädettävään järjestelmään. Jos mittauspiirissä on viiveitä, huomaisivat säädintoiminnot prosessin muutokset liian hitaasti. Erosuureen pienikin poikkeama voi kieliä siitä, että säädettävässä prosessissa on voinut jo tapahtua sellainen muutos, joka vaatii tavallista tehokkaampaa ohjausta.

Säätöalgoritmi muodostuu kolmesta erikseen määriteltävästä parametrilla. Näiden perusteella lasketaan ohjausarvo joka voidaan esittää kaavan 3 avulla.

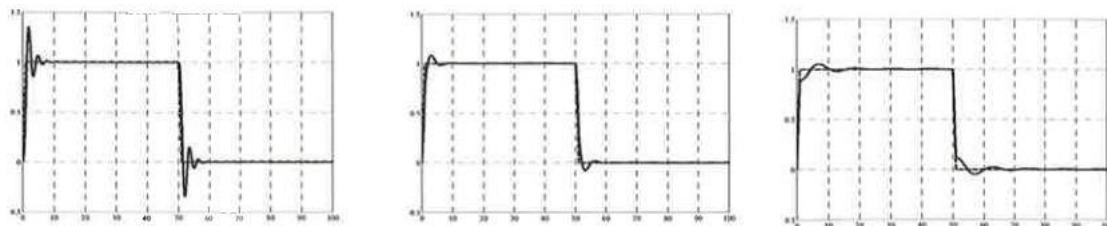
$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^{t_1} e(\tau) d\tau + T_D \frac{d}{dt} e(t) \right) \quad (3)$$

Kuvassa 13 on PID-säädön käyttäytyminen avoimen piirin askelvastekokeessa, kun erosuureta muutetaan yksikköaskelfunktiona. Kun erosuure muuttuu, nousee ohjaussuure välittömästi rakenteellisen maksimiin, mutta nyt ohjaussuure laskeekin derivointiajan määräämällä nopeudella yhtyen vahvistuksen ja integroinnin muodostamaan ohjaussuureen muutoksen. (Hietalahti 2012, 125.)



Kuva 13. PID-säädön reagointi askelvastekokeessa (Hietalahti 2012, 125).

Kuvassa 14 näkyy PID-säädön käyttäytyminen suljetussa piirissä eri derivointiajan arvoilla. Säätimen vahvistus ja integrointiaika pidetään kaikissa tilanteissa samana. Derivointiaika on vasemmalla ylhäällä 0 sekuntia, oikealla 7 sekuntia ja alimmassa 20 sekuntia. Derivointitermin vaikutus häiriöllisissä prosesseissa on voimakasta, koska se yrittää derivoida eroosuureessa olevaa nopeasti vaihtelevaa häiriötä. Toisinaan  $T_d$ :stä käytetään myös nimitystä ennakointiaika. (Hietalahti 2012 125–126.)



Kuva 14. PID-säätö askelvastekokeessa derivointiajan muuttuessa (Hietalahti 2012, 125).

#### 4.4 Säätojärjestelmän mittauselimet ja standardiviesti

Prosessin tilaa seurataan mittauselimeen kuuluvan anturin ja lähettimen avulla, jotka on yleensä integroitu yhteen saman kotelon sisään. Anturin tarkoituksena on muuntaa

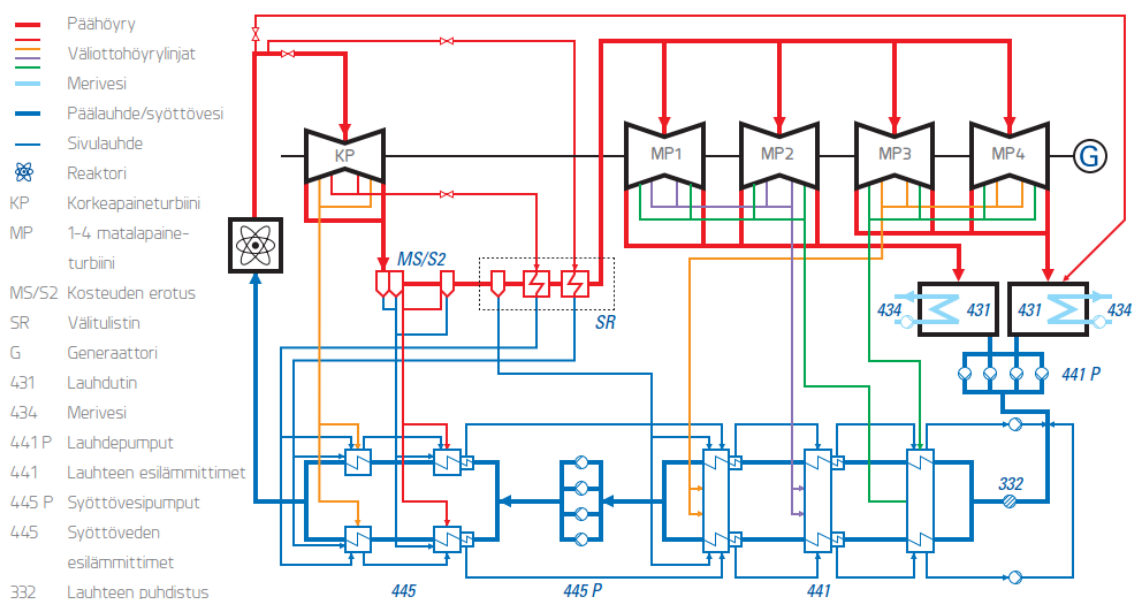


prosessisuureen oloarvo sähköiseksi. Anturin mittaama prosessisuure voi olla esimerkiksi lämpötila, virtaus, paine, pinnankorkeus tai pyörintänopeus. Mittauslähetin muuntaa sähköisen mittausarvon analogiseksi standardiviestiksi.

Standardiviesti lähetetään joko virtaviestinä (4–20 tai 0–20 milliampeeria) tai jänniteviestinä (1–10 voltia). Yleensä standardiviestin virta-arvona on 4–20 milliampeeria, jolloin virta ei normaaliolosuhteissa koskaan alita 4 milliampeeria. Tällöin sähkönsyöttö voidaan tuoda mittauselimelle saman viestikaapelin avulla. Samalla esimerkiksi viestikaapelin katketessa putoaisi virta nolnaan, joka indikoisi välittömästi vikaa. Analoginen viesti, jonka virta-arvo on 4–20 milliampeeria, tuodaan standardiviestinä säätimen summaimen oloarvotuloon. Kun mittausarvo lähetetään virtaviestinä, on se käytännössä ongelmaton. Sen sijaan, kun mittausarvo lähetetään jänniteviestinä, johtimissa tapahtuu aina jännitehäviötä, mikä saattaa aiheuttaa muutoksia jänniteviestin arvossa. (Jansson 2000, 22.) Tällaiset vanhat analogiset järjestelmät ovat poistumassa ja viestiliikenne on jo pitkälti digitalisoitunut.

## 5 SYÖTTÖVESIJÄRJESTELMÄ JA SEN SÄÄTÖ

Syöttövesijärjestelmän päätehtävänä on esilämmittää ja siirtää lauhduttimilta tulevaa vettä reaktorille sekä nostaa paine yli reaktorin paineen syöttövesipumppujen ja reaktoripaineastian välillä. Syöttövesijärjestelmän pumpuilla ja venttiileillä säädetään myös reaktoritankin veden pinnan korkeus ohjearvojen mukaisiksi. Lauhde- ja syöttövesijärjestelmän pääkierto on esitetty kuvassa 15. (TVO 2013, 31.)



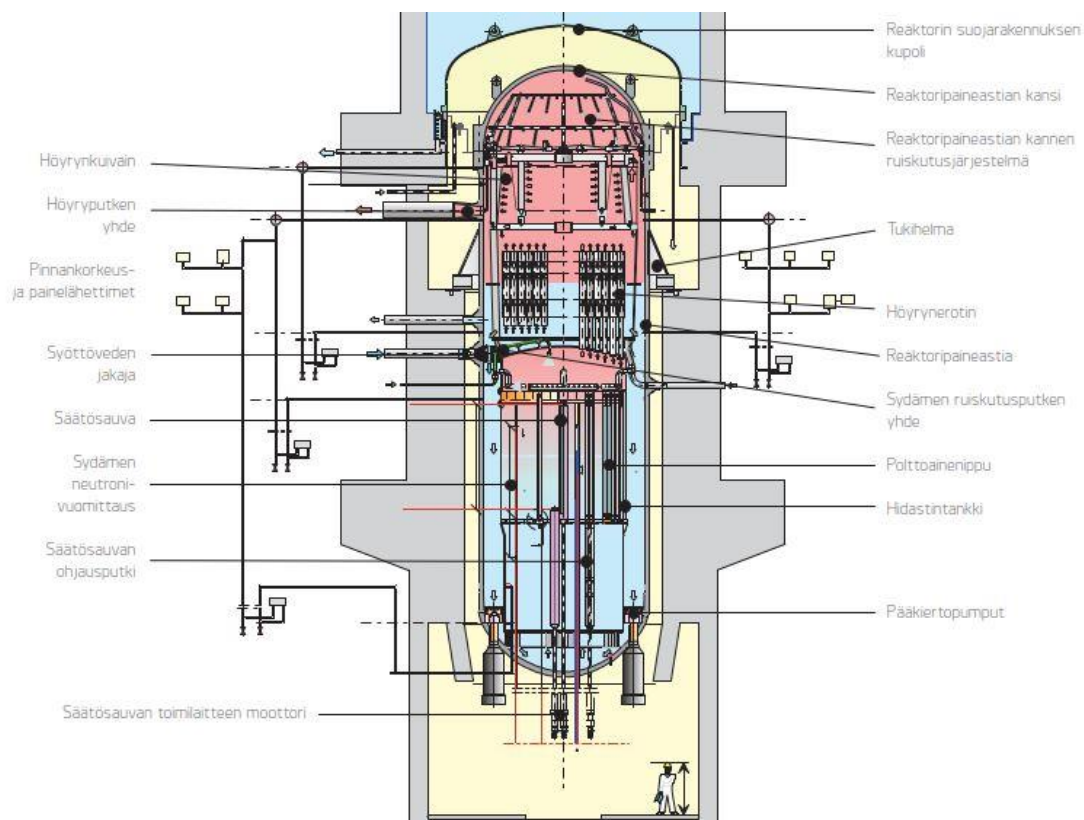
Kuva 15. Lauhde- ja syöttövesijärjestelmän pääkiertokuvassa näkyy aineiden virtaukset ja rajat (TVO 2013, 31).

Kiehutusvesireaktorilta lähtevän kuuman ja kuivatun höyryn virratessa korkea- ja matalapaineturbiinien läpi kohti lauhdutinta, luovuttaa se energiaansa korkea- ja matalapaineturbiinien pyörittämiseen. Turbiineilta höyry virtaa niiden alapuolella sijaitsevaan lauhduttimeen, jossa höyry jäädytetään takaisin vedeksi. Lauhduttimessa jäädyttävänä virtauksena kiertää merivesi, jota puhdistuksen jälkeen pumpataan lauhduttimiin. Lauhduttimien jälkeen vettä kutsutaan lauhteeksi, joka pumpataan edelleen matalapaine-esilämmittimien ja puhdistuksen kautta syöttövesipumpuille. (TVO 2013, 30–31.)

Matalapaine-esilämmitinjärjestelmässä on kolme portaittain olevaa lauhteen esilämmitintä. Niiden avulla lauhteen lämpötilaa nostetaan noin 30 astetta jokaisessa esilämmitinportaassa. Syöttövesipumpuille virtaavan lauhdeveden lämpötila on noin 120 astetta. Matalapaine-esilämmittimien jälkeen lauhdeveden painetta korotetaan neljällä syöttövesipumpulla yli reaktorin paineen. Syöttövesipumpuista virtaavaa vettä kutsutaan syöttövedeksi. (TVO 2013, 30–31.)

Syöttövedettä lämmitetään pumppujen jälkeen vielä kahdessa korkeapaine-esilämmityslinjassa, joissa kummassakin on kaksi peräkkäistä lämmitintä. Syöttöveden lämpötilaksi saadaan korkeapaine-esilämmittimien jälkeen noin 185 astetta. Lämmitykseen tarvittava höyry syötetään matalapaine-esilämmittimille korkeapaineturbiinin ulostulosta ja korkeapaine-esilämmittimille korkeapaineturbiinin väliotosta. Syöttöveden kokonaisvirtaus ajettaessa täydellä teholla on 1 250 kilogrammaa sekunnissa. (TVO 2013, 30–31.)

Syöttövesi johdetaan reaktoripaineastiaan neljän erillisen syöttövesiputken ja syöttövesijakajan avulla. Reaktoripaineastian halkileikkaus on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Reaktoripaineastian halkileikkaus (TVO 2013, 17).

Nämä syöttövesiputket sijaitsevat reaktoripaineastian sisäpuolella 90 asteen välein, jolloin vesi saadaan ohjattua tasaisesti ympäri reaktorin paineastiaa. Tärkeimpiä yhteyksiä paineestiassa ovatkin juuri höyry-, syöttövesi- ja jäähdytysyhteet. Kaikki tärkeimmät putkiyhteet ovat reaktorisydämen yläpuolella, jolloin putkirikon sattuessa varmistetaan, että reaktorisydän pysyy veden pinnan alapuolella.

Reaktorin sisällä pääkiertovirtausta reaktorisydämen läpi pitävät kuusi pääkiertopumppua, jotka ovat sijoitettuna paineastian pohjaan 60 asteen välein. Vesi kiertää reaktoritankin rengastilaa pitkin alas ja nousee sieltä ylös paineastian keskeltä reaktorisydämen läpi samalla jäähdyttäen sydäntä. Samalla vesi höyrystyy jatkaen höyrynerottimen ja kuivaimen läpi kohti turbiinia. Pääkiertovirtauksen vesimäärä on polttoaineen palamasta riippuen 7 600–8 360 kilogrammaa sekunnissa. (TVO 2013, 24.)

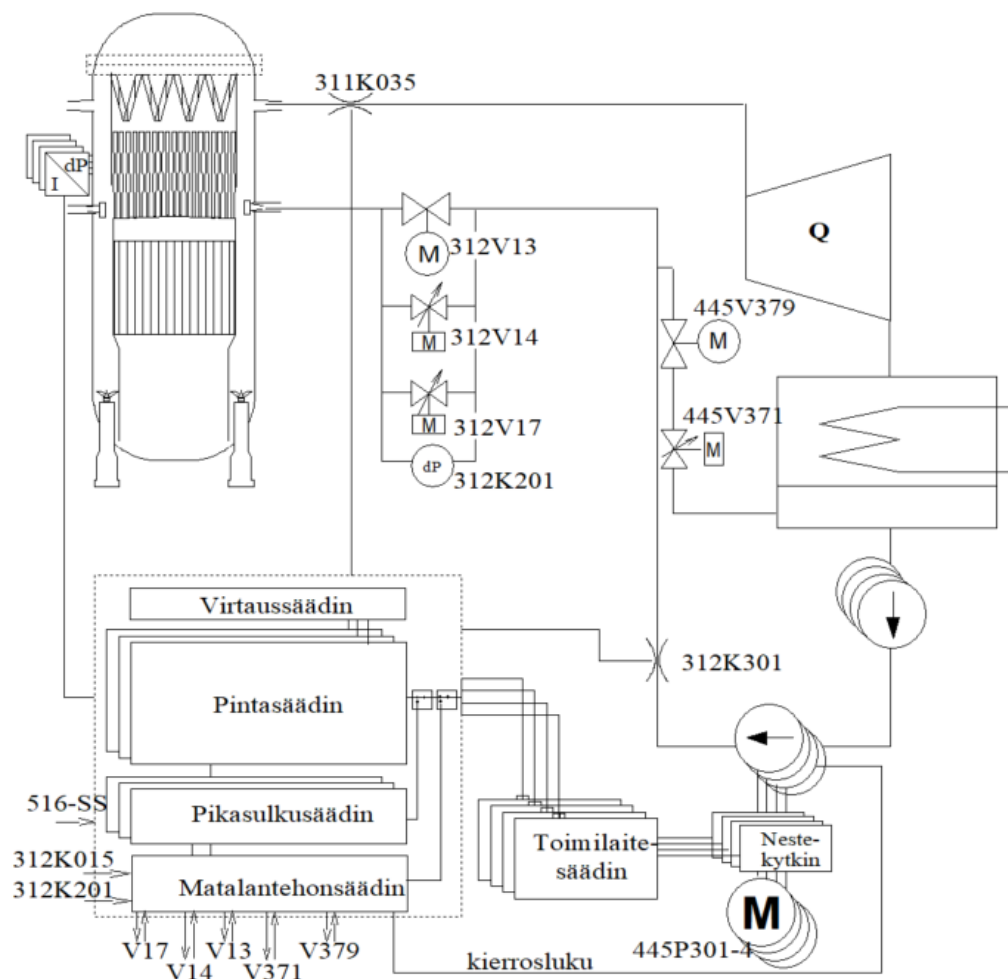
## 5.1 Syöttövesipumput

Syöttövesipumppujen sähkömoottorit ovat Strömbergin valmistamia 3-vaiheisia oikosulkumoottoreita. Moottoreiden teho on 4,9–5,0 megawattia ja käyntikierrosluku 1450 kierrosta minuutissa. Syöttövesijärjestelmässä oleva säätöpiiri suojaa syöttövesipumppujen sähkömoottoreita ylivirralla. Syöttövesipumppu on KSB:n valmistama yksivaiheinen keskipakopumppu, jonka imu on toteutettu kummaltakin puolelta juoksupyörää. Vesipumpun ja sähkömoottorin välissä on Voith:n hydraulikytkin, jonka avulla muutetaan pumpun kierroslukua 2000 ja 7500 kierroksen välillä. Kierrosluvun säätö on toteutettu kohdesäätimen ohjaamalla toimilaitteella, joka muuttaa öljyn määrää hydraulikytkimessä. Tehoajossa syöttövesipumpuista vain kolme on käynnissä, ja yhtä pidetään varapumppuna. (Paasikivi 2013, 16.)

## 5.2 Syöttöveden säätöjärjestelmän tehtävät

Syöttöveden säätöjärjestelmän päätehtävänä on pitää vedenpinta reaktoripaineestiassa rajojen L1 ja H1 välillä – kaikilla reaktoritehoilla ajettaessa kuin myös reaktorin ollessa kuumasammutettuna. Järjestelmän reaktoripikasulku rajoittaa tarvittaessa reaktoripaineastiaan menevää syöttövesivirtausta: alhaisella teholla ajettaessa järjestelmä

estää transienttien syntyminen syöttövesiyhteisiin reaktoripaineastiaan menevän virtausviestin ja virtaussäätäjän avulla. Syöttöveden säätöjärjestelmän säätimet on esitetty kuvassa 17. Virtaamaa vähennetään ja lisätään putkistossa olevien säätöventtiilien avulla sekä muuttamalla neljän rinnankytketyn syöttövesipumpun kierroslukua.



Kuva 17. Syöttöveden säätöjärjestelmän säätimet (Paasikivi 2013, 7).

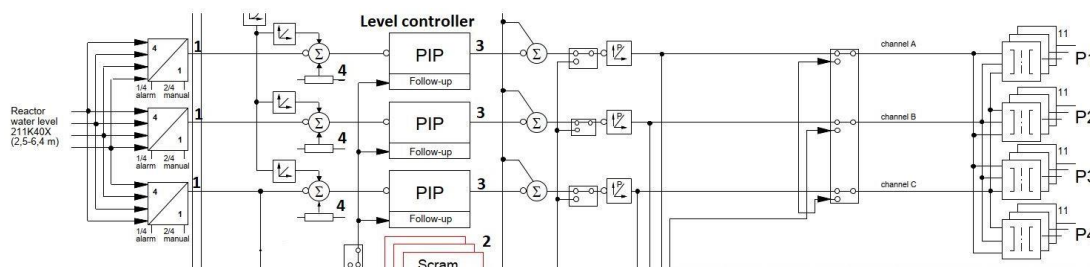
Syöttöveden virtausta säädetään ajo- ja tehotilanteen mukaan kolmella eri säätömuodolla: pääsäädöllä, pikasulkusäädöllä tai matalantehonsäädöllä. Pääsäätö sisältää pinta- ja virtaussäätimen: pintasäätimellä säädetään reaktorin veden pinnan korkeutta ja virtaussäätimellä säädetään syöttöveden virtaamaa (kg/s). Pikasulkusäätöön kuuluu virtaussäätimen lisäksi asetusarvoramppilaite, jolla virtaus ajetaan tasaisesti alas. Matalan tehon säätö sisältää pinta- ja virtaussäätimen lisäksi paine-erosäätimen, jolla säädetään paine-eroa syöttövesipumppujen ja reaktoripaineastian välillä sekä venttiilien ohjauslogiikan, jolla säädetään venttiilien asentoa virtauksen kuristamiseksi, koska pelkästään pumppujen kierrosluvun alentaminen ei matalatehoajolla riitä. Kaikkien

edellä mainittujen säätömuotojen toteutus hoidetaan toimilaitesäätimillä, jotka ohjaavat venttiilien asentoa tai moottoreiden kierroslukua. (Paasikivi, 2013, 4–5.)

### 5.2.1 Syöttövesijärjestelmän pääsääto

Pääsäädössä muodostetaan syöttövesipumppujen kierrosluvun asetusrvo toimilaitesäätimille pintasäätimen (engl. level controller) ja virtaussäätimen (engl. flow controller) avulla. Asetusrvo perustuu reaktorin pinnankorkeuteen ja kokonaishöyry- sekä syöttövesivirtauksesta saatuihin virtausmittaussignaaleihin.

Pintasäätimen osa pääsäädöstä on vallitseva. Pintasäätimelle pinnan korkeuden oloarvo saadaan reaktorin paineastian rengastilasta eli pinta mitataan höyrynerottimen kuoren ja reaktoripaineastian ulkoseinämän välissä (ks. kuva 16). Reaktorin pinnan korkeutta mitataan neljällä redundantisella mittauspiirillä +2,5 ja +6,5 metrin väliltä. Mittamuuntimelta lähtevä virtasignaali vaihtelee 4–20 milliampeeriin pinnan tason vaihdella 6,5–2,5 metriin. Reaktorin pinnan korkeuden asetusrvo määritellään pintasäätimelle 4, lohossa 5 olevalla potentiometrillä (ks. kuva 18). (Paasikivi 2013, 25.)

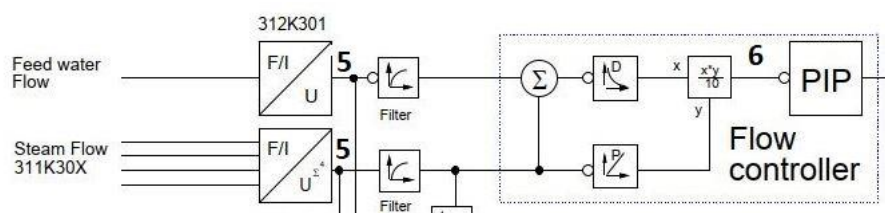


Kuva 18. Pintasäädin. Keskiarvoyksikkö pinnankorkeudelle (1), ohjelasäädin reaktorin pikasulkun (2), PI-toimintoinen säädin takaisinkytkennällä pinnan ohjaukseen (3), potentiometri pinnan korkeuden esisäättämistä varten (4) (Paasikivi 2013, 53).

Yksittäiset viat jonkin säätöpiirin komponenteissa eivät aiheuta reaktoripikasulkua, sillä vikasietoisuuden parantamiseksi pintasäädin ja pikasulkusäädin on rakennettu kolmikanavaisiksi. Jokaisessa toimilaitesäätöpiirissä on oltava keskiarvolaskenta kaikkien kolmen kanavan signaalista. Pintasäätimessä kolmikanavaisia lohkoja ovat keskiarvoyksiköt pinnanmittaukselle, PI-säädin pinnan säätöön sekä potentiometrit pinnan korkeuden esisäättöä varten. (Paasikivi 2016, 7.)

Pinta, jota halutaan säätää, on höyrynerottimen kuoren sisällä, jossa staattinen paine poikkeaa kuoren ulkopuolen paineesta. Tällöin mitattu pinnan korkeus ei ole sama kuin kuoren sisällä vallitseva pinnan korkeus, sillä poikkeaman suuruus on riippuvainen höyryn virtauksen määrästä. (Paasikivi 2016, 12.)

Virtaussäätimelle tuodaan syöttöveden ja höyryn kokonaisvirtaussignaalit standardi-viestin virta-arvona. Höyryvirtausta mitataan jokaisessa höyryputkessa venturiputken ja sen mahdollistavan paine-eromittauksen avulla. Mittamuuntimelta lähtevä höyryn virtaussignaali vaihtelee 4–20 milliampeeriin höyryvirtauksen vaihdellessa 0–350 kilogrammaan sekunnissa. Asetusarvo virtaussäätimelle on kierrossa vallitseva kokonaishöyryvirtaus. Se muodostetaan lohossa 5 olevalla mittaussignaalijärjestelmällä, jossa höyryvirtauksen neljästä mitta-arvomuuntimesta tulevat signaalit summataan ja linearisoidaan. Tämän jälkeen kokonaishöyryvirtaussignaali (0–1400 kilogrammaa sekunnissa) viedään lohossa 6 olevalle virtaussäätimelle (ks. kuva 19). (Paasikivi 2013, 27.)



Kuva 19. Virtaussäädin. Vahvistin syöttövesi- ja höyryvirtaukselle (5), PI-toimintoinen säädin takaisinkytkennällä ja höyryvirtauksesta riippuvalla integroivalla sovituspierillä sisältäen ylä- ja alarajat virtauksen säätöön (6) (Paasikivi 2013, 53).

Syöttövesivirtausta mitataan puolestaan kuristuslaipan ja paine-erolähtetimen avulla. Mittamuuntimelta lähtevä syöttöveden virtaussignaali vaihtelee 4–20 milliampeeriin virtauksen vaihdellessa 0–1400 kilogrammaan sekunnissa. Signaali käsitellään mittaussignaalijärjestelmällä lohossa 5, jossa syöttövesivirtaussignaali linearisoidaan ja välitetään virtaussäätimelle. (Paasikivi 2013, 28.)

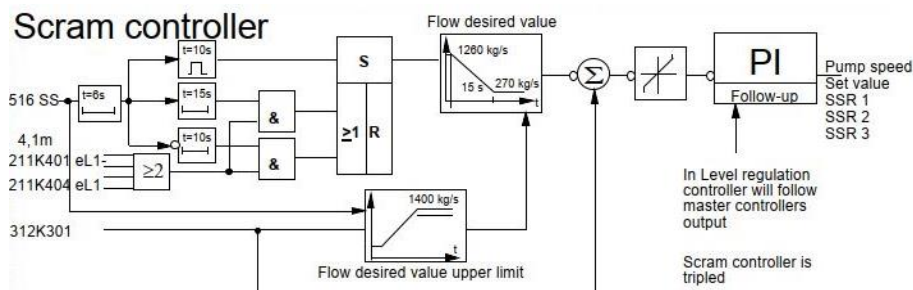
Syöttövesijärjestelmän epälinearisuutta on kompensoitu järjestelmässä olevalla virtaussäätimen korjauspiirillä, jonka tarkoituksena on muuttaa säätimen vahvistus suhteessa yhdestä neljään, kun höyryvirtaus nousee nolasta täyteen virtaukseen. Tällöin järjestelmän dynaaminen toiminta paranee, eli käytännössä asetuservojen muutokset

havaitaan nopeammin virtaussäätimellä. Tämä mahdollistaa sen, että syöttöveden virtaama muuttuu nopeasti silloin kun höyryvirtaus muuttuu. (Paasikivi 2013, 8.) Virtaussäätimeltä ulos tuleva signaali on verrannollinen höyryvirtauksen ja syöttövesivirtauksen eroon. Virtaussäätimeltä lähtevä signaali summataan pintasäätimeltä lähtevään signaaliin sekä takaisinkytketään pintasäätimeen (Paasikivi 2016, 8–12).

### 5.2.2 Pikasulkusäätö

Pikasulkusäätö on olemassa mahdollisten vikatilanteiden varalta. Jos normaalit käyttöparametrit ylittyvät, rajoitusjärjestelmät pyrkivät korjaamaan laitoksen tilan normaalkiksi, jottei suojausjärjestelmää tarvitse käynnistää. Jos käyttöparametrit ylittävät suojausjärjestelmän kynnysarvon, käynnistetään suojaustoimintoja, esimerkiksi reaktorin pikasulku. Tällaisia reaktorin pikasulun käynnistäviä vikatilanteita voivat olla esimerkiksi höyrylinjan katkeaminen tai muut vakavat prosessin häiriöt. (TVO 2013, 43.)

Reaktoripikasulussa reaktorin teho laskee hyvin nopeasti, mikä johtaa höyryvirtauksen pientymiseen 100 prosentista 30 prosenttiin muutamassa sekunnissa. Samalla reaktorin pinta alkaa laskea aukkoisuuden romahtamisen johdosta. Ilman pikasulkusäädintä syöttövesipumppujen kierrokset nousisivat huomattavasti, kun syöttövesipumput yrittäisivät pumpata lisää vettä reaktoripaineastiaan vedenpinnan korkeuden nostamiseksi. Koska höyryvirtaus on pientynyt 30 prosenttiin, on myös esilämmitys kytketty pois ja tällöin syöttöveden lämpötila lähtee laskemaan. Pikasulkusäätimen (engl. scram controller) toimintaperiaate on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20. Pikasulkusäätimen toimintaperiaate. Syöttöveden säätöjärjestelmässä on kolme pikasulkusäädintä (Paasikivi 2013, 53).



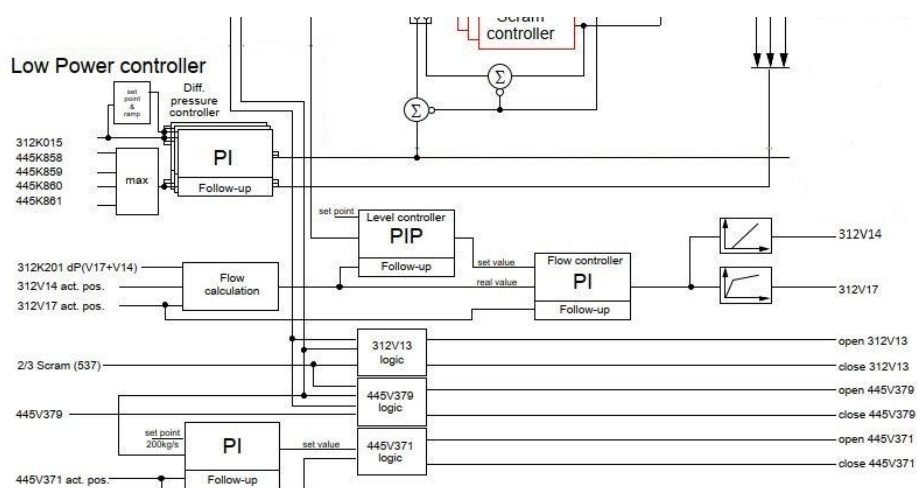
Reaktoripikasulussa pikasulkusäädin saa tiedon reaktorin suojausjärjestelmästä ja kytkeytyy toimintaan kuuden sekunnin viiveellä (ks. kuva 20). Tällöin pikasulkusäätimen asetusrampppilaite alkaa tasaisesti pienentää syöttövesivirtausta 15 sekunnin rampilla alas aina 270 kilogrammaan sekunnissa. (Paasikivi 2013, 8.)

Pikasulkusäädöllä saadaan vähennettyä reaktoripaineastiaan kohdistuvia jäähtyneen syöttöveden aiheuttamia termisiä transientteja eli lämpötilan nopeita muutoksia, jotka vaikuttavat reaktoripaineastian ja putkiyhteiden eheyteen.

### 5.2.3 Matalan tehon säätö

Matalan tehon säätö on käytössä, kun syöttövesivirtaus pienentyy 170–3 kilogrammaan sekunnissa tai kasvaa 3–200 kilogrammaan sekunnissa. Matalan tehon säädöllä ajettaessa säädetään kuristussäätöventtiilejä 312V14 ja 312V17. Venttiilit säätävät virtausta kuristamalla reaktoripaineastian pintaa, koska syöttövesipumpun kierroslukusäätö ei yksinään siihen riittävällä tarkkuudella pysty.

Matalantehonsäädin (engl. low power controller) sisältää pintasäätimen ja virtaussäätimen sekä säätöventtiilien, kierrätysventtiilien ja sulkuventtiilien ohjaimet eli loogiset yksiköt (ks. kuva 21).



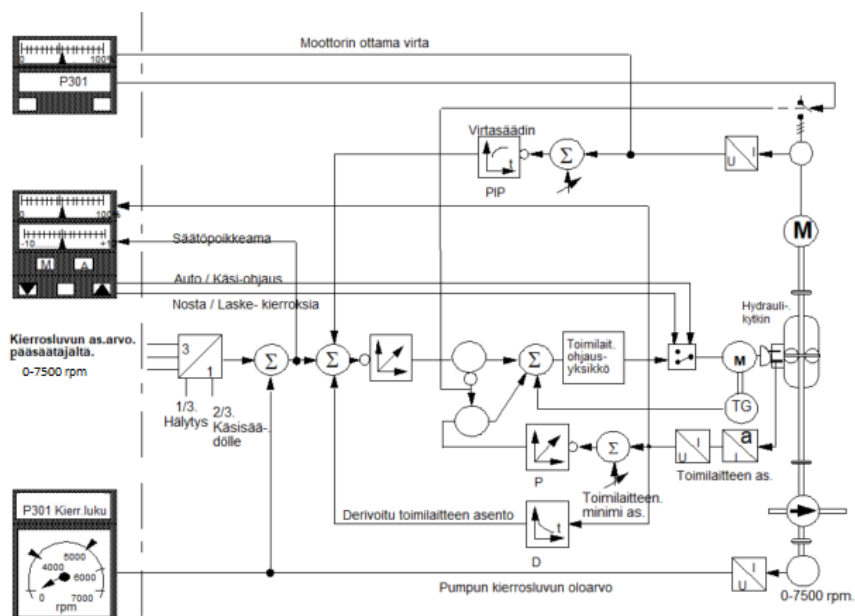
Kuva 21. Matalantehonsäätimen toimintaperiaate (Paasikivi 2013, 53).

Matalantehonsäätimen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 21. Kun syöttövesivirtaus on pieni, kuristetaan virtaus säätöventtiileillä. Venttiili 445V371 säätelee kierrätysvirtausta lauhduttimen läpi. Venttiilien 312V13 ja 445V379 asennot riippuvat ajotilanteesta, mutta lauhduttimen linja 445V379 sulkeutuu ja 312V13 avautuu, kun syöttövesivirtaus yltää ylösajossa 350 kilogrammaan sekunnissa. Venttiilit 311K035 ja 312K301 mittaavat höyryn- ja syöttöveden virtausta.

### 5.3 Syöttöveden pumpun toimilaitesäädin

Kaikilla syöttövesipumppujen toimilaitteilla on oma itsenäinen kierroslukusäätimensä. Säätimet on suunniteltu niin, että ne eivät ole toisistaan riippuvaisia. Toimilaitesäätimissä käsitellään pää- ja matalantehonsäätimeltä tulevat kierrosluvun ohjaussignaalit ja muodostetaan ohjaussignaali syöttövesipumppujen hydraulikytkimien toimilaitteiden moottorien ohjaamiseen.

Jotta jokaisella pumpulla olisi samansuuruinen kuormitus, tulevat signaalit jokaiselle säätäjälle keskiarvoyksikön (engl. averaging unit) kautta, keskiarvoyksikön tarkoituksena on laskea kaikkien kolmen pääsäätäjältä tulevan signaalin keskiarvo, joka myöhemmin summainten kautta välitetään pumpun kohdesäätimelle (ks. kuva 22).



Kuva 22. Toimilaitesäätimen ohjaussignaalit (Paasikivi 2013, 19 [osin muokattu]).

Pumppujen kohdesäätimet eivät ole redundanttisia, mutta järjestelmän käyttö- ja toimintavarmuus saavutetaan neljällä erillisellä syöttövesipumpulla, jossa jokaisen kapasiteetti OL1- ja OL2-laitoksilla on 34 prosenttia kokonaisvirtauksesta. Näin yhtä pumppua voidaan pitää varalla ja ainoastaan kolme pumppua neljästä on käynnissä jatkuvasti.

Toimilaitesäädin ohjaa toimilaitteen moottoria niin, että haluttu syöttövesipumpun kierrosluku saavutetaan. Toimilaitteen moottorilla on takometri, jolta saatu mittaus-signaali välittää toimilaitteen moottorin kierrosnopeuden ja muodostaa näin takaisin-kytkennän kierroslukusäätimelle, tämä mahdollistaa vakaamman säädön toimilaitteelle. Toimilaitteen asentotieto on tuotu takaisin derivoivan piirin kautta säätimelle.

Kierrosluvun oloarvo näkyy myös valvomon ohjauspulpetissa. Toimilaitteen asento tuodaan valvomon pulpettiin asennonosoitusmuuntimelta. Syöttövesipumpun ollessa pysäytettynä ja moottorikatkaisimen ollessa AUKI-asennossa, ajetaan toimilaitemoottori valmiiksi noin 10 prosentin asentoon, jos säädin on jätetty automaatile. Lisäksi säätimessä on pumpun moottorin ylikuormituksen ehkäisemiseksi virtamittaus, jolloin virran kasvaessa yli nimellisvirran säädin pienentää pumpun kierroksia. Säädön oloarvona toimii moottorin ottama virta. Kierroslukusäätimessä on myös A/M-yksikkö, jolla pumpun kierroslukua pystytään säätämään käsin.

Syöttövesipumpun kierroslukua säädetään sähkömoottorin ja pumpun välissä olevalla Voith:n hydraulikytkimellä. Kytkimen hydrauliohjain määrää säädetään Schoppe & Faeser 25-30T -toimilaitteella. Sen Schoppe & Faeser M 163 LT -sähkömoottoria ohjaa kierroslukusäätäjä. (Paasikivi 2013, 16.)

## 6 SYÖTTÖVESIPUMPUN KIERROSLUKUSÄÄTIMEN HUOLTO

Hydraulikytkimen toimilaitteiden, kuten venttiilien ja pumppujen, sähkömoottoreita ohjataan Combitrol-yksiköllä, joka on suunniteltu analogisia ohjaus- ja säätöjärjestelmiä varten. Toimintayksiköt ovat Combiflex-rakennejärjestelmän pistoyksiköitä (ks. kuva 23). Jokainen yksikkö on varustettu niiden etulevyissä olevilla asetuslaitteistoilla, mikä helpottaa parametrien sovittamista haluttuun toimintaan sopivaksi. (TVO 1973a.)



Kuva 23. Turbiinin syöttövesijärjestelmän säätöpiiri, joka on rakennettu Combitrol-toimintayksiköistä. (Kuva: Jarmo Kananen)

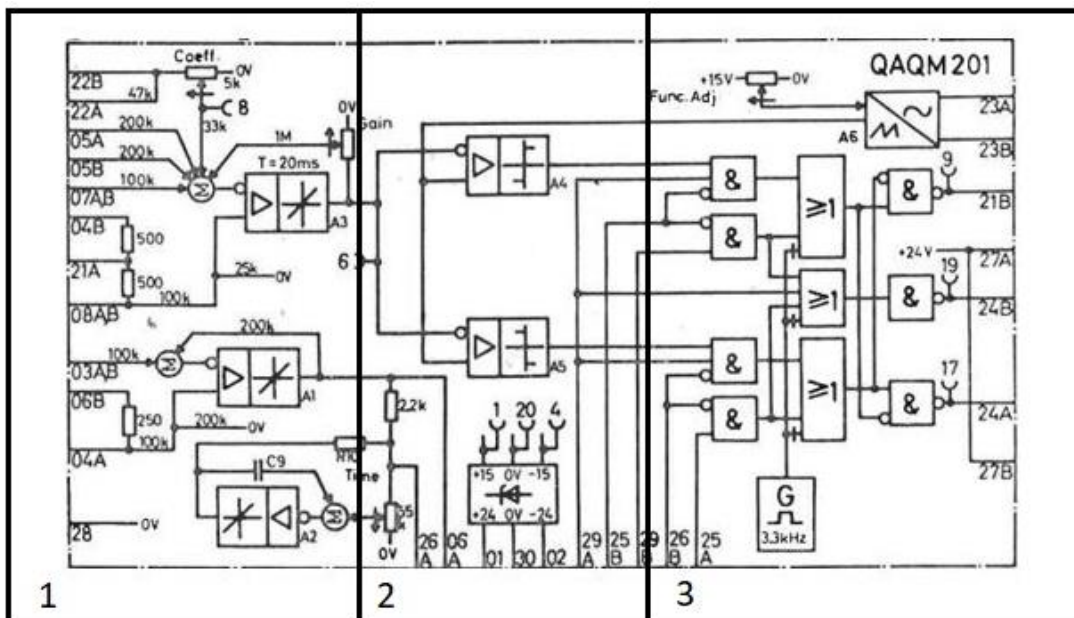
Sähkön syöttö Combitrol-yksikköön on toteutettu tasajännitteellä  $\pm 24$  voltia (20...30 voltia). Yksikön sisäiset signaalien käsittelyt toteutetaan jännitesignaaleilla  $\pm 10$  voltia. Tulopiireissä käytetään jännitesignaaleja  $\pm 10$  voltia, mutta niissä on mahdollista käyttää sivuvirtavastusten avulla myös jännitteitä  $\pm 5$  voltia. Lähtösignaalit ovat jännitesignaaleja välillä  $\pm 10$  voltia, jotka kestävät kuormitusta 5 milliampeeria. Suurempaa tehoa tarvittaessa käytetään tehoasteita, joita voi käyttää jännite- sekä virtalähtöinä. (TVO 1973a.)

Seuraavissa alaluvuissa pohditaan, miten säädin- ja toimilaitesäätömoottoriparin toimintaa voitaisiin kunnossapidon kannalta testata.

### 6.1 Toimilaitteen kierroslukusäädin Combitrol QAQM201

Combitrol QAQM201 -toimilaitemoottorin säätökortti on aikoinaan kehitetty jatkuvasti ohjattujen 2-vaihemoottoreiden triac-tyyppisten tehoasteiden ohjaukseen. Säätökortin toimintakaavio on esitetty kuvassa 24.

Säätökorttia voi käyttää kahdella tavalla: joko puhtaana ohjausasteena tai suhteellisena säätäjänä eli P-säätimenä. Puhtaana ohjausasteena säädin muuntaa jatkuvan tulosignaalin pulssimaiseksi lähtösignaaliksi, joka on sovitettu ohjaamaan perässä seuraavaa triac-tyyppistä tehoastetta. Suhteellisena säätäjänä säätökortti muodostaa tulosignaalin perusteella johtoarvon toimilaitteen asennolle ja takaisinkytkkee yksikölle anturisygnäalin suhteellisesta asennosta ja vertaa tätä johtoarvoon. Yksikkö tuottaa kantiaalto- maista vaihtojännitettä, josta tehoasteen QAPM210 kaksisuuntaaville tyristoreille eli triac-venttiileille muodostetaan sytytyspulsseja. (TVO 1973a.)



Kuva 24. Combitrol QAQM 201 -toimilaitemoottorin ohjausasteen eli säätökortin toimintakaavio. (TVO 1971.)

QAPM210-tehoasteella oleva vaihtojännite on liitetty ohjausasteelle, jossa se toimii referenssijännitteenä. Tuleva vaihtojännite muutetaan saha-aaltomuodossa olevaksi jännitteeksi, jolla on kuitenkin sama vaihe vaihtojännitteen kanssa. Tasokriminaattori (kuvassa 24 vahvistimet A4/A5) vertaa tätä saha-aaltojännitettä virhesignaaliin, jonka suuruus on suhteellinen säätöpoikkeamaan. Jos virhesignaali on pienempi kuin saha-aaltojännitteen huippuarvo, saavat triac-venttiilit sytytyspulssin sinä jakson aikana, jona saha-aaltojännitteen amplitudi on pienempi kuin virhesignaali. Tällöin triac-venttiilit johtavat suuremman tai pienemmän osan jokaisesta puolijaksosta riippuen virhesignaalin suuruudesta. Suuremmilla erosuurensignaaleilla kuin saha-aaltojännitteen huippuarvo muodostuvat sytytyspulssit ilman katkosta, eli triac-venttiilit johtavat koko ajan ja täysi lähtöjännite saadaan tehoasteelta. (TVO 1973a.)

Tulopiiri on rakennettu vertailuvahvistimen A3 ympärille (ks. kuva 24). Tulopiirissä on sovitukset sekä virta-, että jännitesignaaleille. Vahvistinta voidaan säätää etulevyssä olevan GAIN-potentiometrin avulla, jolla on säädettävä vahvistus ja sitä voidaan käyttää suhteellisena säätäjänä. COEFF-potentiometri on käytössä potentiometritulona takometrin signaalille. Tulopiirissä on myös derivoiva piiri, jolla on säädettävä aikavakio ja sitä voidaan käyttää stabilointiin, mikäli sellaiselle on tarve. (TVO 1973a.)

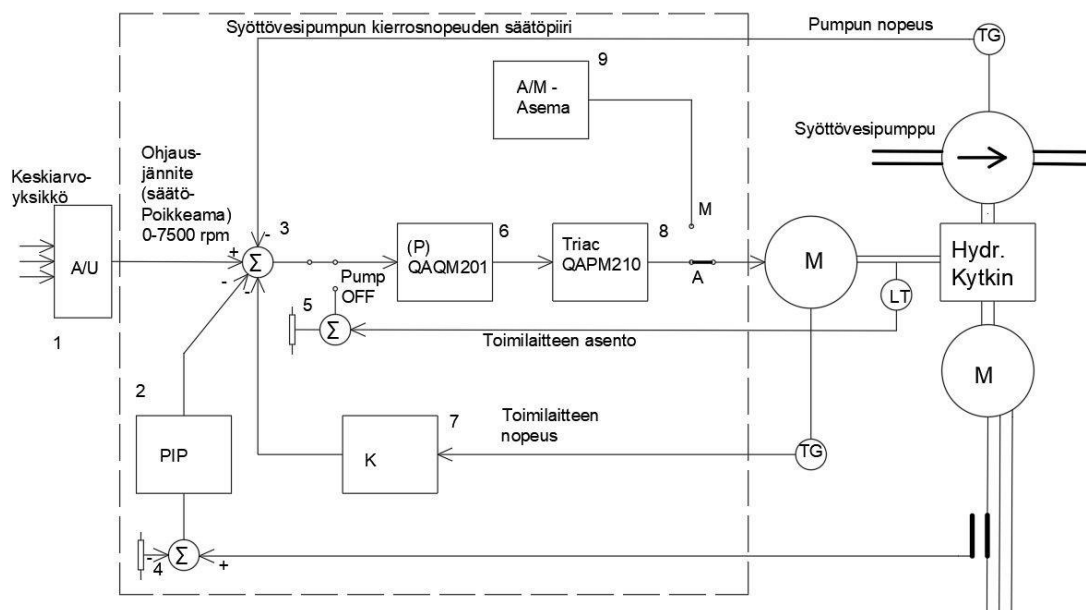
Vertailupiiri käsittää tasokriminaattorit eli vahvistimet A4:n ja A5:n (ks. kuva 24), joissa verrataan saha-aaltojännitettä tulopiirin lähtöjännitteeseen. Vahvistimissa ei ole takaisinkytkentöjä. Heti kun kaksi jännitettä ovat erilaisia, saavat vahvistimet täyden ulostulon, johtuen niiden korkeasta vahvistuskertoimesta. Vahvistimet ovat kytketty niin, että ne ohjautuvat eri suuntiin. Jotta pulssi voi jatkaa sytytyspulssina, täytyy vahvistin olla ohjattu ulos positiivisena. Se kanava joka saa positiiviset pulssit, määrätään tulosignaalin merkillä ja pulssin pituus tulosignaalin amplitudilla. (TVO 1973a.)

Ohjausaste käsittää kolme lähtöpiiriä (kuvassa 21B, 24B ja 24A), joista kahta käytetään LISÄÄ- ja VÄHENNÄ-ohjausta varten. Kolmas lähtöpiiri on moottorin jarrutoimintoa varten. Ohjausaste sisältää myös piirit loogisen ehdon muodostukseen sekä tulot automaattista (29A) tai käsin tapahtuvaan ohjausta varten (29B ja 25A). Looginen ykkönen edellä mainituille saadaan asetettua jännitteellä +24 voltilla. (TVO 1973a.)

## 6.2 Kierroslukusäätimen ja toimilaitemoottorin huollon tarpeen arviointi

Toimilaitesäätimet ovat olleet hyvin luotettavia eikä niissä ole ilmennyt vikoja. Combitrol-korttien entinen valmistaja ASEA (Allmänna Svenska Elektriska AB) on luonut säätökorttien sisäisille komponenteille testausohjeet, joita ei kuitenkaan ole automaatiokunnossapidossa tarvinnut käyttää komponenttien hyvän toimintavarmuuden ansiosta. Kortin vikaantuessa se on vaihdettu uuteen. Isoimmat toimintahäiriöt pumpun kierroslukusäädössä ovat olleet lähinnä toimilaitteissa ja etenkin niiden moottoreissa. Kunnossapitoinsinööri A. Sinkkosen mukaan toimilaitemoottoreiden vaihtoja ja kierrosluvun mittauksen virityksiä on tehty 2000-luvulla useita kertoja. (Henkilökohtainen tiedonanto 11.9.2019.)

Kierrosluvun muuttaminen on toteutettu tuomalla toimilaitesäädinkortille tuloon 05A (ks. kuva 24) jännite eli säätöpoikkeama pääsäätimen haluamasta kierrosluvusta. Signaalissa on otettu valmiiksi huomioon pumpun senhetkinen pyörintänopeuden oloarvo summaimessa (3), joka sijaitsee säätöpiirissä ennen säädintä (ks. kuva 25). Pumppu pysäytettynä ja ohjauksen ollessa automaattilla ajaa säädin toimilaitemoottorin valmiiksi 10 prosentin ohjausasettoon.



Kuva 25. Kierrosluvun säätöpiiri. Keskiarvoyksikkö kolmelta kanavalta (1), PI-säädin takaisinkytkennällä moottorin ylivirtasuojauksia varten, jos moottorin ottama virta ylittää nimellisvirran ajetaan pumpun kierroksia alas (2), summain (3), potentimetri moottorin maksimi virran asettamiseksi (4), potentimetri toimilaitteen asetusarvoa varten, kun pumppu sammutettu ja ohjaus automaattilla (5), Ohjausaste

QAQM201, toimii suhteellisena säätäjänä (P-säädin) (6), jännitteen jakaja takaisin-kytkennän esiasettamista varten toimilaitteen takogeneraattorilta (7), Triac-tehoaste toimilaitemoottorille, lähtö 240V 50 Hz (8), M/A yksikkö (engl. manual / automatic) toimilaitteen asentoa ja säätöpoikkeamaa osoittavalla mittarilla (9). (TVO 1973b [uudelleen piiretty]).

Kierrosluvun oloarvo tuodaan summaimeen, pumppuakseliin kiinnitetyltä pulssianturilta mittamuuntimen kautta. Kierrosluvun mittaus tosin ei ole kovin tarkka vaan sen tarkkuus on koko mittausalueelta 0,4 prosenttia, tällöin laskemalla voidaan todeta kierrosluvun tarkkuuden olevan 30 kierrosta minuutissa ( $7500 \times 0,4 = 30$ ) (Kananen 2018, 12). Mittausta ollaan kuitenkin uusimassa ja uuden mittauksen tarkkuudeksi on tulossa 0,1 prosenttia, joka on jo huomattavasti aiempaa tarkempi.

Pääsäätimeltä kierroslukusäätimelle tuleva säätöpoikkeaman jännite on joko negatiivinen tai positiivinen. Kun ohjausjännite on negatiivinen, halutaan kierroksia vähentää, kun ohjausjännite on positiivinen, kierroksia halutaan lisätä. Ohjausjännite voi teoriassa vaihdella  $\pm 10$  voltin välillä riippuen pumpun kierrosluvusta. Käytännössä tämä on mahdollista vain pumpun ollessa pysäytettynä ja säätöpoikkeaman ollessa maksimilla eli 7500 kierrosta minuutissa. Toisin sanoen maksimikierrosluku ohjauksessa on 7500 kierrosta minuutissa, mikä vastaa 10 voltia. Yksi kierros minuutissa vastaa 1,33 millivolttia ( $10 \text{ V} \div 7500 \text{ rpm} = 1,33 \text{ mV/rpm}$ ). Pääsäätimen muuttaessa kierrosnopeutta 200 kierrosta minuutissa pienemmäksi tai suuremmaksi, täytyy tulevan säätöpoikkeaman kortin tulossa 05A olla  $\pm 0,266$  voltia.

Syöttövesipumpun säätöön liittyvät QAQM201- ja QAPM210-kortit tai toimilaitemoottori voidaan vaihtaa myös pumppujen käynnin aikana. Huollon kohteena olevan syöttövesipumpun ohjauksessa siirrytään tällöin käsiajolle, ja senhetkinen kierrosnopeus jää vallitsevaksi. Säätöjärjestelmä voi muiden käynnissä olevien pumppujen kierroslukua muuttamalla edelleen vaikuttaa syöttöveden kokonaisvirtaukseen. Käsiajolle siirtymisen jälkeen säädinkortti tai toimilaitemoottori voidaan irrottaa ja vaihtaa.

Säätö toimii niin, että aina kun pääsäätimeltä tuodaan riittävän suuri säätöpoikkeama kierrosten muuttamiseksi, pitää säätimen lähteä ohjaamaan toimilaitemoottorin avulla toimilaitetta asentoon, jolla haluttu pumpun kierrosluku saavutetaan. Lähtökohtana on, että toimilaitemoottori lähtisi liikkeelle mahdollisimman pienellä säätöpoikkeamalla



eikä moottorin tai toimilaitteen liike saa olla nykivää. Mitä pienempi säätöpoikkeama on, sitä rauhallisemmin säädön pitää liikuttaa moottoria uuteen asentoon. Suurella säätöpoikkeamalla toimilaitemoottorin pitää pyöriä nopeammin. Säätöpoikkeamalle ei ole määritelty virallista arvoa, jolla toimilaitemoottorin asennon pitäisi alkaa muuttua, mutta hyväksyttävänä arvona A. Sinkkosen mukaan on pidetty  $\pm 0,14-0,17$  voltia (Henkilökohtainen tiedonanto 25.9.2019).

Seuraavassa vuosihuollossa testataan toimilaitemoottorin sekä toimilaitteen liikettä ja kuntoa testikortilla, jolla simuloidaan pääsäätimeltä tuleva säätöpoikkeama. Pumpujen ollessa pysäytettynä, jännite tuodaan testikortilta tuloon 05A. Muuttamalla säätöpoikkeamaa 0,01 voltin askelin, voidaan todeta, millä jännitearvolla moottori alkaa pyöriä. Testi toistetaan sekä positiivisella, että negatiivisella jännitteellä. Samalla nähdään kentällä, koska moottori ja toimilaitte lähtevät liikkeelle ja liikkuvatko ne esimerkiksi tasaisesti vai nykien. Testin aikana nähdään niiden liikenopeus ja onko toimilaitteessa mahdollisesti mekaanista väljyyttä.

Toimilaitemoottorin pyörintänopeus tuodaan takometriltä säätimen tuloon 22B. Jännitteen tarkoituksena on kompensoida moottorin ohjausta eli rauhoittaa säätöä ja toimilaitemoottorin pyörintänopeutta. Takometriltä tuleva jännitesignaali tarkastetaan testauksen aikana, jolloin sen suuruus ja napaisuus todetaan oikeaksi. Jotta takometrillä olisi säätöä hidastava vaikutus, täytyy sen olla potentiaaliltaan vastakkainen testikortin jännitteeseen verrattuna. Irrotettaessa signaali säätimeltä moottorin tulisi pyöriä nopeammin.

Testin aikana mitataan myös moottorin ottamaa virtaa, jonka maksimiarvon tulee pysyä määritellyissä rajoissa. Virralla voidaan arvioida moottorin kuntoa, mutta hyväksyttävää maksimi virta-arvoa ei ole määritelty. Maksimiarvo tullaan määrittelemään, kun testejä saadaan tehtyä. Moottorin toiminnan testaamiseksi huoltotiloissa on olemassa valmis testialusta, jossa kierroslukusäätöön liittyvät ohjaus- ja tehoaste ovat liitettyinä (ks. kuva 26). Sillä tehdyissä testeissä moottorin ottama virta oli liikkeellelähdessä 200 milliampeeria, mutta myös kuormana olevan toimilaitteen vaikutus täytyy ottaa huomioon.

Säätimelle tulevan toimilaitteen asentolähtetimen tarkastus suoritetaan ajamalla toimilaitte mekaaniseen minimiin ja maksimiin. Jännitesignaalin tulisi olla minimissään +0,1 ja maksimissaan +10,1 voltia.



Kuva 26. Toimilaitemoottorin testialusta säätiminen. (Kuva: Petri Rautio)

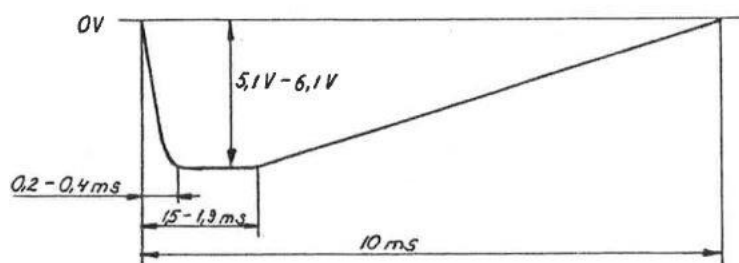
Testien perusteella voidaan päätellä toteuttaako säädin ja toimilaittekombiinaatio muutoksia riittävän pienellä säätöpoikkeamalla. Samalla tarkkaillaan, mikä on liikkeen nopeus, onko moottorin ottama virta rajoissa ja mikä on takometrilta tulevan jännitteen suuruus ja napaisuus. Näiden avulla voidaan päätellä, vaaditaanko toimilaitemoottorille tai toimilaitteelle huoltoa.

Yhtenä vaihtoehtona olisi tietysti muuttaa säätimen vahvistusta sen etulevyssä olevalla potentiometrillä, jolloin moottorin liikkeellelähtö tapahtuu pienemmällä säätöpoikkeamalla. Vahvistusta ei voi kuitenkaan määrättä kasvattaa, koska se aiheuttaa moottorin liikkeen jo pienellä säätöpoikkeamalla. Tällöin on mahdollista, että säätö jatkuvasti sahaa edestakaisin pienelläkin säätöpoikkeamalla.

Kortin etupaneelissa olevien potentiometriä asetukseksi oikeisiin arvoihin, on niihin annettu valmiit asetusrivot Teollisuuden Voiman dokumentaatioissa. Ne on kuitenkin määritelty jo vuonna 1984. Dokumentaatioissa oleviin arvoihin täytyy suhtautua varauksella, koska prosessissa on tehty muutoksia ja päivityksiä reilun kolmen

vuosikymmenen aikana. Ohjeen mukaan säätimen GAIN täytyisi asettaa arvoon 5, COEFF arvoon 0,05 ja DER.TIME 2 sekuntiin. Kahden jälkimmäisen osalta arvot pitävät tänä päivänäkin paikkansa.

Combitrol-yksiköiden huolto-ohjeessa on saha-aaltojännitteen tarkastamiseen ja säätämiseen ohje (FUNC.ADJ). Liittimiin 23A ja 23B tuodaan 6 voltia 50 Hz:n taajuudella, ja etulevyssä olevan testipisteen 16 ja 0 voltia väliltä mitataan oskilloskoopilla. Oskilloskoopilla tarkasteltuna jännitekäyrän tulee alkaa nollan kohdalta ja pulssin pituus olla 10 millisekuntia. Jännitteen amplitudin täytyy olla välillä 5,1–6,1 voltia. (Ks. kuva 27.)



Kuva 27. Sahalaitajännitteen säätö (TVO 1972).

Kunnossapitoinsinööri A. Sinkkosen mukaan ohjeen arvoilla tehtäessä on kierroslukusäätö kuitenkin toiminut laiskasti ja jännitepulssin käyrän alku onkin säädetty 0,5–1,0 voltin välille, eikä siihen ole tämän jälkeen tarvinnut koskea. (Henkilökohtainen tiedonanto 11.9.2019.)

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Prosessien ohjaamiseen on aiemmin käytetty analogisia ohjaimia, nykyään analogisista ohjaimista on kuitenkin siirrytty tekniikan kehittyessä ja automaatiojärjestelmien määrän kasvaessa käyttämään digitaalisia signaaleja ja tietokoneita. Silti analogisia ohjausjärjestelmiä on käytössä vielä esimerkiksi vanhemmissa ydinvoimaloissa, joissa niiden päivittäminen uudempiin järjestelmiin olisi useita vuosia kestävä prosessi, johon muutostyön suunnittelusta, hyväksymisestä ja toteuttamisesta ydinvoimalaan. Nykyisten järjestelmien varaosien saantivaikeudet yhdistettynä Olkiluodon yksiköiden pitkään käyttöikään väistämättä aiheuttavat tilanteen, että järjestelmiä on uusittava ja modernisoitava. Nykyisillä kahdella vanhimmalla laitosyksiköllä käyttölupaa on kuitenkin vielä 20 vuotta. ABB onkin avannut ASEA:n jo lopettamien tuotteiden valmistuksen uudelleen.

Näin 2020-luvun kynnyksellä sähkö- ja automaatiotekniikan opinnoissa keskitytään pääosin nykyaikaiseen ohjaustekniikkaan, kun taas analogiset ohjausjärjestelmät ovat jääneet hyvin vähäiselle huomiolle. Tutkimuksen kohteena olevan laitoksen säätöjärjestelmä perustuu kuitenkin vanhaan analogiatekniikkaan ilman digitaalista ohjausta, joten tutkielman tekeminen edellytti syvällistä perehtymistä analogisen säätötekniikan saloihin sekä 1970-luvulla valmistuneen ydinvoimalan prosessin toimintaan ja sen syöttövesijärjestelmän säätöön. Työssä käsiteltävä tutkimusmateriaali on peräisin liki viiden vuosikymmenen takaa, joten niissä olevia piirrosmerkkejä ja kaavioita oli työläs tulkita. Teollisuuden Voiman arkistoista löytyi kuitenkin vanhaa koulutusmateriaalia, jonka avulla se oli mahdollista. Arkistoitua aineistoa oli käytettäväksi yllättävän paljon, ja siihen sisältyi myös Combitrol-yksikköjen vanhoja esitteitä, toimintakuvauksia ja huolto-ohjeita. Säätötekniikan kirjallisuutta oli myös saatavilla useilta vuosikymmeniltä ja eri säätöratkaisuja on mallinnettu matemaattisesti monin eri tavoin. Valitsin tämän työn lähteiksi pääosin mahdollisimman uusia teoksia.

Aiheen rajaus ei ollut helppoa, sillä ydinvoimalassa on käytössä sähkö- ja automaatiotekniikkaa valtavan laajalti. Aihe rajattiin syöttövesijärjestelmän automaatioon, sillä tulevat työtehtäväni todennäköisesti liittyvät jollakin tasolla kyseisen osa-alueen kat-

tavaan turbiinilaitoksen automaatiokunnossapitoon. Syöttövesijärjestelmän tarkat rakenneselvitykset jätettiin tutkimuksen ulkopuolelle, esimerkiksi venttiilien ja syöttöpumppujen ohjaukset erilaisilla kuormituksilla ajettaessa, ja keskityttiin pääasiassa järjestelmän ohjauksen kulun kuvaamiseen. Samoin säätötekniikasta avattiin yksityiskohtaisesti ainoastaan eri säädinten toimintaa ja niiden vaikutusta prosessin ohjaukseen. Suunnittelun kannalta säätötekniikan hallitseminen ja yhdistely eri järjestelmien kanssa on vaativaa, johtuen sen laajuudesta, sekä siihen vaadittavista matemaattisista taidoista.

Työn tuloksena syntyi käsitys siitä, miten kierroslukusäädintä voitaisiin testata vuosi- huoltojen aikana. Valmiin testikortin avulla voitaisiin syöttää jännitettä säädinkortin tuloon, eli simuloitaisiin pääsäätimeltä tuleva säätöpoikkeama. Jännitetasoa nostettaisiin hiljalleen ja samalla havainnoitaisiin, millä jännite-erolla eli säätöpoikkeamalla toimilaitemoottori lähtee liikkeelle. Näin nähtäisiin, vastaako toimilaite myös moottorin liikkeeseen, vai onko siinä jo vanhuuden aiheuttamaa väljyyttä tai muita mahdollisia ongelmia sen toiminnassa. Toki olisi tarkasti määriteltävä, millä säätöpoikkeamalla eli kierrosluvun erolla säätöliike pitää tapahtua. Tämän avulla voitaisiin päätellä, kuinka suuri täytyy kierrosluvun ero olla, ennen kuin toimilaitesäädin toteuttaa toimilaitteella liikkeen.

Tämän työn tarkoituksena ei ollut tehdä varsinaista huolto-ohjetta Teollisuuden Voiman automaatiokunnossapidon käyttöön, koska se olisi ajankäytöllisistä syistä ollut haasteellista. Huollolle tehtävän ohjeen täytyy olla hyvin yksityiskohtainen ja selkeä, ja se vaatii asiantuntijoiden tarkastamisen ja hyväksynnän tarkkoine perusteluineen. Tämän jälkeen yksikön päällikkö hyväksyy ohjeen käytettäväksi kunnossapidossa. Tätä selvitystyötä on kuitenkin mahdollista hyödyntää jatkotutkimuksen ja mahdollisesti myöhemmin koostettavan huolto-ohjeen taustamateriaalina.

## LÄHTEET

Fennovoima 2019. Fennovoiman verkkosivut: Näin ydinvoimalaitos toimii. Viitattu 20.7.2019. <https://www.fennovoima.fi/ydinvoima/nain-ydinvoimalaitos-toimii>

Hietalahti, L. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.

Jansson, E. 2000. Säädotekniikka 2000: Sääto ja mittaustekniikka. Iisalmi: IS-VET OY.

Kananen, J. 2018. Esiselvitys - toimilaitteen vaihto. Eurajoki: Teollisuuden voima Oyj.

Posiva Oy 2019. Posivan verkkosivut: Posiva on ydinjätehuollon asiantuntija. Viitattu 27.7.2019. <http://www.posiva.fi/posiva#.XXTdeygzZPY>

Paasikivi, O. 2013. Syöttöveden säätöjärjestelmä. Koulutusmateriaali Teollisuuden Voiman sisäiseen käyttöön. [Sähköinen asiakirja.] Eurajoki: Teollisuuden voima Oyj.

Paasikivi, O. 2016. OL1/OL2 – Feed water control system – Final safety analysis report. Raportti Teollisuuden Voiman sisäiseen käyttöön. [Sähköinen asiakirja.] Eurajoki: Teollisuuden voima Oyj.

Savolainen, J. & Vaittinen, R. 2007. Säädotekniikan perusteita. Helsinki: Suomen Robotiikkayhdistys ry.

Sinkkonen, A. 2019. Kunnossapitoinsinööri, Teollisuuden Voima. Eurajoki. Henkilökohtainen tiedonanto 12.9.2019.

TVO 1971. Tekninen esite Combitrol-toimintayksiköistä. Teollisuuden voiman suomenkielinen käännös ASEA:n esitteestä laitoksen sisäiseen käyttöön. [Moniste.] Eurajoki: Teollisuuden Voima Oyj.

TVO 1972. Laitevalmistajan huolto-ohje QAQM 201 -yksikölle. Teollisuuden voiman suomenkielinen käännös ASEA:n ohjeesta laitoksen sisäiseen käyttöön. [Moniste]. Eurajoki: Teollisuuden Voima Oyj.

TVO 1973a. Tekninen esite Combitrol-toimintayksiköistä. Teollisuuden voiman suomenkielinen käännös ASEA:n esitteestä laitoksen sisäiseen käyttöön. [Moniste.] Eurajoki: Teollisuuden Voima Oyj.

TVO 1973b. Kaaviokuva syöttövesijärjestelmän säädöstä. Kaaviokuva laitoksen sisäiseen käyttöön. [Moniste.] Eurajoki: Teollisuuden Voima

TVO 2009. Perustietoa Olkiluoto 3:sta. Toimintaperiaate, käyttö, turvallisuus. [Tekninen esite.] Viitattu 24.7.2019. Saatavissa: [www.tvo.fi/uploads/File/2009/OL3\\_perusesite\\_2009\\_FI\\_final.pdf](http://www.tvo.fi/uploads/File/2009/OL3_perusesite_2009_FI_final.pdf)

TVO 2013. OL1 ja OL2 Ydinvoimalaitosyksiköt. [Tekninen esite.] Viitattu 23.7.2019. Saatavissa: [www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/OL1\\_OL2\\_laitosyksikot\\_tekninen\\_esite\(2\).pdf](http://www.tvo.fi/uploads/julkaisut/tiedostot/OL1_OL2_laitosyksikot_tekninen_esite(2).pdf)

TVO 2014. Teollisuuden Voiman verkkosivut. [Uutiskirje.] Viitattu 20.7.2019. <https://www.tvo.fi/news/1511>

TVO 2019a. Teollisuuden Voiman verkkosivut: Tuotanto. Viitattu 20.7.2019. <https://www.tvo.fi/tuotanto>

TVO 2019b. Teollisuuden Voiman verkkosivut: TVO yhtiönä. Viitattu 20.7.2019. <https://www.tvo.fi/yhtio>

TVO 2019c. Teollisuuden Voiman verkkosivut: TVONS – TVO Nuclear Services LTD. Viitattu 20.7.2019. [https://www.tvo.fi/tvons\\_fi](https://www.tvo.fi/tvons_fi)

TVO 2019d. Teollisuuden Voiman verkkosivut: Raaka-aineet ja materiaalitehokkuus. Viitattu 20.7.2019. <https://www.tvo.fi/Raaka-aineetmateriaalitehokkuus>

Özbay, H. 1999. Introduction to feedback control theory. Boca Raton: CRC press LLC.

