

Forskning

Regleringen av matarvattenflödet i en PWR

Med exempel från Ringhals 3

Bengt-Göran Bergdahl

Ritsuo Oguma

September 2007

SKI-perspektiv

Bakgrund

Säkerheten i kärntekniska anläggningar skall upprätthållas genom att radiologiska olyckor förebyggs. I reaktorer sker detta genom att det finns flerfaldiga barriärer och ett så kallat djupförsvar. I djupförsvaret ingår att åtgärder vidtas för att tillförsäkra lugn och störningsfri drift utan transienter som kan utmana säkerhetssystemen. Exempel på transienter som skall undvikas är sådana som orsakas av felfunktioner i matarvatten- och hjälpmatarvattensystemen. Erfarenheter har visat att denna typ av transienter har relativt hög förekomstfrekvens och att de kan ge ett inte obetydligt riskökningsbidrag. Den reaktivitetshändelse som inträffade 1999 i Oskarshamn 2 var en okontrollerad matarvattentransient och en bidragande orsak vid denna händelse var trögheten i matarvattenregleringen.

Det finns därför skäl att ytterligare öka kunskaperna om problem som kan uppkomma i reaktorernas matarvattenreglering och åtgärder som kan vidtas för att undvika dessa. Behovet accentueras dessutom av kraftindustrins planer på effekthöjning i flera reaktorer.

Syfte

Projektets syfte har varit att beskriva matarvattenregleringen i en tryckvattenreaktor och att undersöka reglersystemets stabilitet och dynamiska egenskaper som är viktiga för driften och säkerheten i anläggningen. Syftet har också varit att identifiera och belysa potentiella problem i regleringen för att ge såväl SKI som tillståndshavarna ökad kunskap inom området.

Resultat

Rapporten ger en redovisning av kända och potentiella problem med matarvattenregleringen i tryckvattenreaktorer, problem som i vissa fall förekommit tidigare internationellt. Vidare ges en detaljerad beskrivning av matarvattenregleringen vid Ringhals 3, som kan sägas vara representativ även för övriga svenska tryckvattenreaktorer. Analysresultaten visar att R3:s reglering fungerar väl och tyder på att man inte har de problem som avses ovan. Vissa förbättringsmöjligheter framhävs dock i rapporten.

Behov av ytterligare forskning

SKI ser i dagsläget inget ytterligare behov av forskning på matarvattenregleringen för tryckvattenreaktorer. Däremot har SKI för avsikt att under 2007/2008 följa upp forskningsprojektet med en motsvarande undersökning av matarvattenregleringen för kokvattenreaktorer.

Projektinformation

Projektnummer: 200605021

Diarienummer: SKI 2006/860

SKI:s handläggare: Johan Ljung, RT

Forskning

Regleringen av matarvattenflödet i en PWR

Med exempel från Ringhals 3

Bengt-Göran Bergdahl
Ritsuo Oguma

GSE Power Systems AB
P.O. Box 62
SE-611 22 Nyköping
Sweden

September 2007

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Statens kärnkraftinspektion, SKI. Slutsatser och åsikter som framförs i rapporten är författarens/författarnas egna och behöver inte nödvändigtvis sammanfalla med SKI:s.

Sammanfattning

En omfattande undersökning av matarvattenregleringen vid Ringhals 3 har genomförts vid GSE Power Systems AB på uppdrag av SKI. Uppdraget baseras på signalanalys av en omfattande mängd mätdata som registrerats vid verket i samband med olika prov.

Förutom resultat med signalanalys presenteras kända problem vid reglering av matarvattenflödet i en PWR. Ett flertal av dem simuleras, analyseras och utvärderas i rapportens inledning med enkla återkopplade system. Simuleringsexemplen utgör sedan en bra bakgrund för förståelsen av det aktuella reglersystemet i Ringhals 3.

De problem som beskrivs som typiska vid reglering av matarvattenflödet vid utländska verk är: *icke minimumfas* hos nivådynamiken, *integratoruppvriddning* hos regulatorer med integrerande funktion, hysteres, glapp eller andra typer av olinjäriteter hos matarvattenventilen som kan leda till svängningar i ”*limit cycle*” samt metoden med *framkoppling* för att minska inflytandet av störningar via ångflödet. Dessa problemtyper demonstreras med simuleringsteknik och möjliga vägar för att hantera problemen diskuteras i rapporten.

Regleringen av matarvattenflödet sker med tre olika reglersystem med olika syften vid Ringhals 3. Det första systemet styr matarvattenventilen så att vattennivån överensstämmer med nivåbörvärdet för varje individuell ånggenerator. Detta system kallas nivåreglersystemet. Det andra systemet styr matarvattenpumparna med syftet att minsta differenstryck över matarvattenventilerna blir lika med börvärdet som är 8 bar. Detta system kallas DP-reglering. Det tredje systemet kompenserar varvtalet hos matarvattenpumparna med syftet att eliminera skillnaden i nivå hos kondensorererna. Detta system kallas kondensoregleringen.

Resultaten visar att DP-regleringen reagerar snabbast med tidskonstanten 13 s. Stegsvartesterna påvisar att reglersystemet ifråga är stabilt utan översväng eller oscillation. Nivåregleringen reagerar med tidskonstanten 60 s vid stegsvartest med liten översväng och med god dämpning. Kondensoregleringen är till sist långsam i sin reaktion och mätdata indikerar att en nivåskillnad av 25 cm mellan kondensorererna utjämnas efter 700 s. Gemensamt för samtliga regulatorer är att de har integrerande funktion som innebär att statisk överensstämmelse nås mellan bör- och ärvärde.

Följande fördelar kan dessutom konstateras för matarvattenregleringen vid Ringhals 3:

Glapp, hysteres eller olinjäriteter som lätt kan leda till oscillation i *limit cycle* förekommer inte i de driftfall som registrerades. Icke minimumfasproblemet som leder till nivåreduktion initialt när matarvattenflödet ökar infann sig inte heller i de driftfall som studerades.

En vidlyftig transient som innebar lastbortfall ner till 50 % kunde hanteras av matarvattenregleringen.

Följande nackdelar kan konstateras för matarvattenregleringen vid Ringhals 3:

Det är stark koppling mellan DP- och nivåregleringen. Denna störande koppling bör dock kunna reduceras med föreslagna framkoppling av DP-signalen eller multivariabel reglering.

Det är ovisst om regulatorerna i Ringhals 3 kompenserats för integratoruppvridding. Det är viktigt att sådan kompensation finns för regulatorer av typen PI och PID ty i annat fall kan transienter drastiskt förvärras. Rapporten visar med ett allmänt simuleringsexempel att integratoruppvridding är ett sovande problem till dess den stora transienten kommer.

Det saknas komplett specifikation om de statiska och dynamiska kraven på reglersystemen vid Ringhals 3 som förelåg vid effektuppgången 2006. Dessa krav är viktiga för att kunna fastställa behovet av underhåll.

De olinjära ventilkurvorna – alltså sambandet mellan matarvattenflöde och ventilposition – har kompenserats med flödesregulatorn. Att kompenseringen verkligen lyckas verifieras inte i Ringhals 3. Detta är ett förbättringsbehov.

Avvikelser hos komponenter i reglersystemen:

En av tre nivåtransmitttrar för ÅG-3 med benämningen 30313LT495 beter sig felaktigt. En intermittent oscillation med varierande frekvens och amplituden 4 % topp–topp förekommer.

© GSE Power Systems AB, Nyköping 2007

Abstract

GSE Power Systems AB sponsored by SKI – the nuclear power inspectorate in Sweden – has performed a comprehensive investigation of the feedwater control system at Ringhals 3. The assignment is based on signal analysis of measurement data recorded in the plant during operation.

Well-known problems in connection to automatic control of feedwater flow in a PWR are also presented in the report outside the area of signal analysis. Some simple feedback systems are analysed and evaluated with the aid of simulation in the introduction of the report. These simulated systems are a good background to understand the actual automatic control systems at Ringhals 3.

Typical problems with feedwater control in foreign plants are: *Non minimum phase* for the water level dynamics in the steam exchanger, *windup* of the controller with integrating function, hysteresis, backlash or other types of non-linearities in the feedwater valve that can result in *limit cycle* oscillations and the method with *feed forward* to reduce the influence of disturbances via the steam flow. These types of problems are demonstrated with simulation and possible ways to reduce the influence are discussed in the report.

The automatic control of feedwater flow is performed with three different control systems with different aims at Ringhals 3. The first system controls the feedwater valve with the aim to maintain agreement between the water reference value and water level in each steam generator. This system is called the water level controller. The second system controls the speed of the feedwater pumps with the aim to maintain 8 bar differential pressure over the feedwater valve for the valve out of three with lowest pressure drop. This is called the DP-control system. The third system compensates the speed of the feedwater pumps with the aim to eliminate difference in condenser levels between the two turbines. This is called condenser control system.

The results prove that the DP-control acts fastest with a time constant equal 13 seconds. The step tests indicate that the control system is stable without transient overshoot or oscillations. The water level control system reacts with the time constant 60 seconds during step test with a small transient overshoot and good damping. The condenser control finally is slow in reaction and measurement data indicate that a level difference of 25 cm between the condensers will be eliminated after 700 seconds. There are static agreements between the reference values and controlled outputs for all controllers since they are of PI or PID types.

The following advantages are observed for the feedwater control system at Ringhals 3:

Backlash, hysteresis or non-linearities that can cause oscillation in limit cycle do not occur during the observed operation. Non-minimum phase resulting in an initial level reduction during a step test when feedwater flow increases was not observed in the recordings.

An extensive transient with 50 % drop in power could be handled by the feedwater control system.

The following drawbacks are diagnosed for the feedwater control system at Ringhals 3:

There is a strong coupling between DP- and water level control systems. This coupling could be reduced with the suggested feed forward of the DP-signal or multi variable control.

It is uncertain if the controllers at Ringhals 3 are compensated for windup. It is important with windup reset for PI and PID controllers that are in use at Ringhals 3 otherwise transients can be gained. The report proves with a simulated general example that windup is a sleeping problem until the huge transient arrives.

A complete specification of the dynamic demands for the control systems at Ringhals 3 is missing. Which are the specified demands?

The non-linear valve curves – the relation between the feedwater flow and valve position – have been compensated with a gain schedule in the flow controller. There is, however, no verification of the compensation in Ringhals 3. This is shortage.

Deviations in components in the control systems:

One of the water level transmitters in Steam generator 3 called 30313LT495 acts incorrectly. An intermittent oscillation occurs with 4 % in amplitude peak to peak.

© GSE Power Systems AB, Nyköping 2007

Innehållsförteckning

1	Bakgrund	11
1.1	Icke minimumfssystem	14
1.2	Integratoruppvridning	17
1.2.1	Exempel med integratoruppvridning	18
1.3	Framkoppling	23
1.4	<i>Limit cycle</i> -svängning	24
2	Matarvattenregleringen vid Ringhals 3	28
2.1	Beskrivning av regleringen vid effekter > 20 %	28
2.2	Reglering av matarvattenventilen med målet att uppnå föreskriven nivå i ånggeneratorn	30
2.3	Reglering av DP-trycket över matarvattenventilerna	33
2.4	Kondensornivåregleringen	34
3	Mätsignalerna	35
3.1	Mätsignalernas egenskaper	36
4	Egenskaper hos I&C-komponenter	45
4.1	Identifiering av regulatorernas parametrar	46
5	Karaktäristiken för matarvattenventilerna	52
6	Undersökning av matarvattenventilens positionsreglering	56
7	Stegsvarstest av nivåregleringen vid låg och hög effekt	60
7.1	Nivåregulatorns PID-parametrar	61
8	Stegsvarstest av DP-regleringen	65
8.1	Dynamiska krav och deras uppfyllelse	65
9	Växelverkan mellan DP-regleringen och Nivåregleringen	68
9.1	Multivariabel reglering	68
10	Reglertekniska bedömningar och förslag	72
11	Slutsatser	75
12	Referenser	76

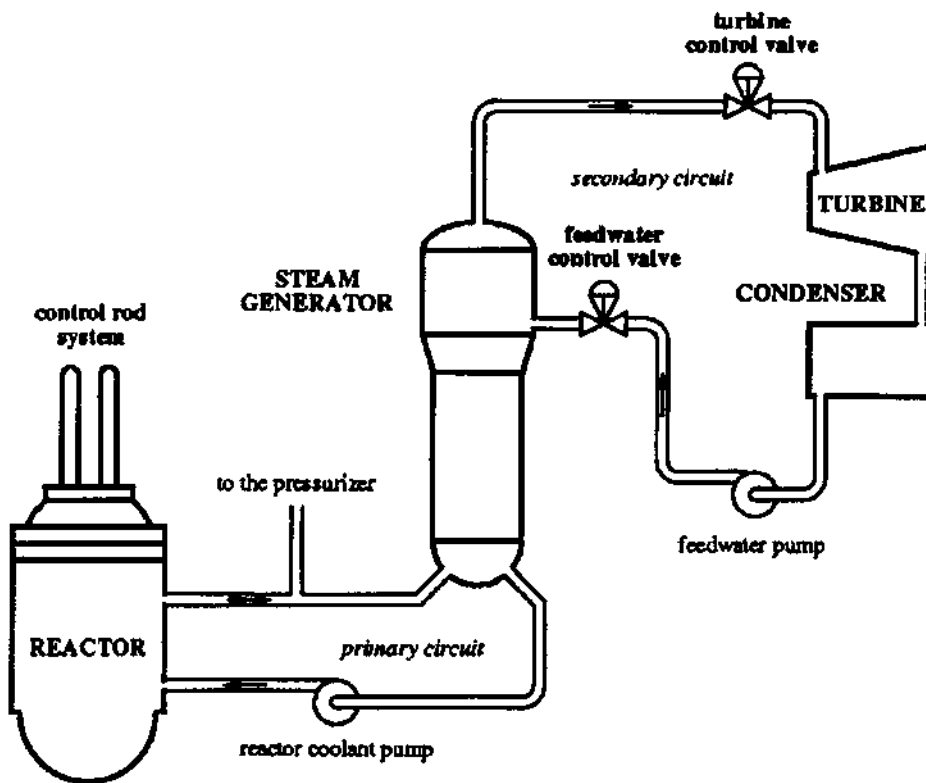
1 Bakgrund

Ångan som driver turbinen i en PWR genereras i anläggningens ånggenerator som samtidigt utgör gränsen mellan reaktorns primär- och sekundärsystem. Vattnet i reaktorns primärkrets pumpas med konstant flöde från reaktorn genom ånggeneratorns tuber där en avkylning sker och sedan åter till den helt vattenfyllda reaktortanken via cirkulationspumpen, se Figur 1.1. Rörledningen som leder fram vattnet till ånggeneratorn kallas varma benet, medan rörledningen som leder vattnet tillbaka till reaktorn benämns kalla benet. Vattnet i varma och kalla benet har de ungefärliga temperaturerna 320 respektive 280 grader C vid fulleffekt, därav namnen varma och kalla benet.

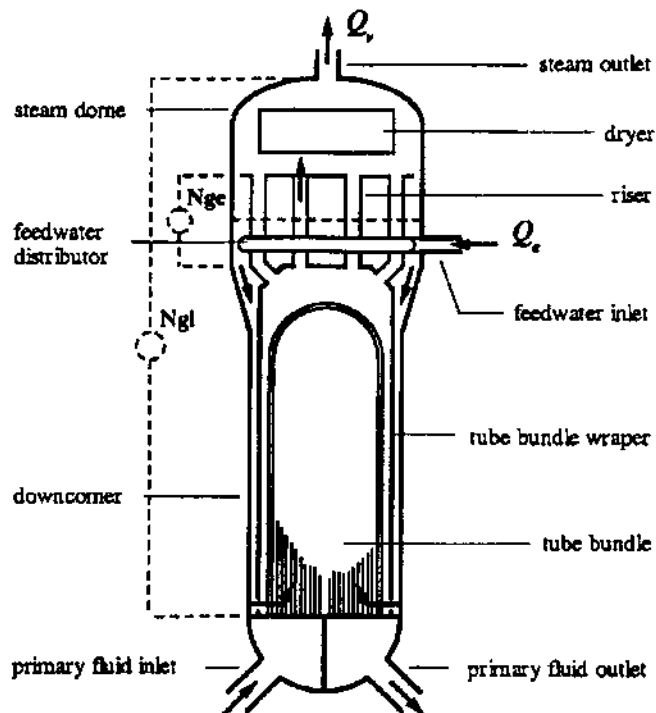
Sekundärkretsen leder det trycksatta ångflödet till turbinen via en ventil, se Figur 1.1. I turbinen omvandlas den energirika ångan till mekanisk energi som sedan övergår i elektrisk energi i anläggningens generator. I kondensorn som är installerad i anslutning till turbinen kondenseras ångan till vatten som i sin tur pumpas tillbaka som matarvatten till ånggeneratorn med matarvattenpumpen; se Figur 1.1. Matarvattenflödet styrs sedan med hjälp av den så kallade matarvattenventilen, och det är styrningen av denna ventil som är fokus i rapporten.

En schematisk bild över ånggeneratorns innandöme visas i Figur 1.2. Primärkretsens heta vatten passerar de parallella u-formade tuberna vertikalt uppåt och sedan nedåt mot primärkretsens utlopp. Tuberna omges av en blandning av vatten och ånga, där ångan genereras i mötet mellan de heta tuberna och ånggeneratorns cirkulerande vatten.

Figur 1.2 visar positionen där matarvattnet kommer in i ånggeneratorn, hur det fördelas radiellt och perifert och blandas med det cirkulerande vattnet för att sedan via fallspalten nå den lägsta positionen där tuberna är infästa. Därefter stiger vattnet under kokning uppåt centralt i ånggeneratorn. Längst upp i ånggeneratorn passeras ångseparatorn, där vattnet avskiljs. Sedan passeras torkarna och på så sätt övergår ångan till torr ånga. Ångan leds därefter via ångledningen och ångventilen till turbinen.



Figur 1.1 © 2000 IEEE. Schematisk bild över reaktorn, primärkretsen, ånggeneratoren, sekundärkretsen och turbinen i en PWR. Figuren har kopierats ur Ref. 1 med tillstånd från IEEE.



Figur 1.2 © 2000 IEEE. Schematisk bild över ånggeneratoren i en PWR. Figuren har kopierats ur Ref. 1 med tillstånd från IEEE.

Matarvattenregleringen är betydelsefull för driften av en PWR. Regleringen består i att styra matarvattenflödet så att vattennivån (*narrow range*) i ånggeneratoren blir konstant. I detta sammanhang är ångflödet den väsentligaste störningen. Flera studier har visat att matarvattenregleringen varit en bidragande orsak till de snabbstopp som förekommer. 1983 noterades att upp till 13 % av de snabbstopp som förekom i franska EDF:s reaktorer var orsakade av reglerproblem med ånggeneratoren, se Referens 1.

De rapporterade reglerproblemen med nivån i ånggeneratoren har olika orsak men flera av dem framgår av följande lista:

- Icke minimumfas hos vattennivådynamiken. Detta innebär exempelvis att nivån initialt reduceras för att sedan öka vid en ökning av matarvattenflödet. Sådana egenskaper förekommer hos ånggeneratorer. Detta framgår av Referens 1. Orsaken är att det ökande matarvattenflödet initialt reducerar voiden i ånggeneratorns övre del över vilken nivåmätningen sker. På så sätt noteras en nivåreduktion som sedan åtföljs av en nivåökning. En process med icke minimumfas kännetecknas av ett nollställe i högra halvplanet hos överföringsfunktionen. Icke minimumfasdynamik innebär att reglermöjligheterna försvaras och fenomenet som sådant beskrivs närmare med ett simuleringsexempel i Kapitel 1.1.
- Begränsningar hos komponenterna i nivåreglersystemet. Matarvattenflödet är begränsat och detta begränsar också reglersystemets prestanda. Begränsningarna kan också leda till integratordrivning hos regulatorn som försämrar reglersystemets egenskaper eller till och med gör det instabilt. Integratordrivning förekommer speciellt vid transienter i anläggningen när det återkopplade systemets begränsningar beträds. Det finns dock metoder för att hantera integratordrivning och en sådan metod presenteras med simuleringsexempel i Kapitel 1.2.
- Framkoppling nyttjas för att förbättra regleringen. Dess funktion är god vid fulleffekt men försämrar drastiskt vid låg effekt där givarna för ång- och matarvattenflöde har försämrad funktion. Principen för framkopplingen i nivåregleringen i Ringhals 3 visas i Kapitel 1.3.
- Olinjäritet hos det återkopplade systemet. Reglersystemet är tydligt olinjärt. Detta framgår bland annat av att dynamiken är olika i olika driftlägen. Olinjäriteterna kan leda till svängningar hos det återkopplade systemet, så kallade *limit cycles*. Dessa kan vara besvärande för materialet i ånggeneratorns tuber. En olinjäritet som exempelvis mekanisk hysteres kan förekomma i en matarvattenreglering i de mekaniska ställdonen för processen, se Referens 2. Ett simuleringsexempel med ett återkopplat system som oscillerar i *limit cycle* på grund av relästyrning med hysteres visas i Kapitel 1.4.

En omfattande verksamhet pågår internationellt för att designa nya reglersystem, ofta baserade på tillståndsvariabler, för att klara regleringen av ånggeneratornivån från låg- till fulleffekt i automatisk mod, se Referens 1 och 3.

1.1 Icke minimumfasystem

Ett system med icke minimumfas kännetecknas av att dess överföringsfunktion har minst ett nollställe i högra halvplanet. Ett sådant system har ett stegsvar som initialt går i motsatt riktning till slutvärdet. Det vänstra diagrammet i Figur 1.3 visar stegsvaret med överföringsfunktionen $G(s)$:

$$G(s) = K_g (1 - T_1 s)/(1 + T_2 s)$$

där $K_g = 0.5$, $T_1 = 2$, $T_2 = 4$.

Överföringsfunktionen $G(s)$ har en pol i vänstra halvplanet vid $-1/T_2$ samt ett nollställe i högra halvplanet $1/T_1$. Stegstörningen införs vid tiden 1 sekund i figuren. Resultatet är det karaktäristiska för ett icke minimumfasystem. Först sker en reduktion hos utsignalen till -0.25 varefter utsignalen stiger med tidskonstanten 4 sekunder upp till slutnivån 0.5 som är överföringsfunktionens förstärkning. Stegsvaret med ett motsvarande minimumfasystem med $T_1 = 0$ i överföringsfunktionen $G(s)$ visas i högra diagrammet i Figur 1.3. Avsaknaden av nollställe i högra halvplanet leder till att stegsvaret omedelbart ökar med tidskonstanten 4 sekunder mot dess slutvärde som är 0.5.

Nästa steg i dynamikjämförelsen mellan ett icke minimumfas- och ett minimumfas-system gäller reglering av systemen. En PI-regulator, det vill säga en regulator med såväl förstärkande som integrerande egenskap, nyttjas för att reglera utsignalen från överföringsfunktionen $G(s)$. Det återkopplade systemet med regulatorm framgår av Figur 1.5. Regulatorns börvärde är $u(t)$, den reglerade storheten $y(t)$, skillnaden mellan börvärdet och ärvärdet $e(t) = u(t) - y(t)$ och regulatorns utsignal är $m(t)$. Regulatorns förstärkning benämns k och integrationstiden T_i .

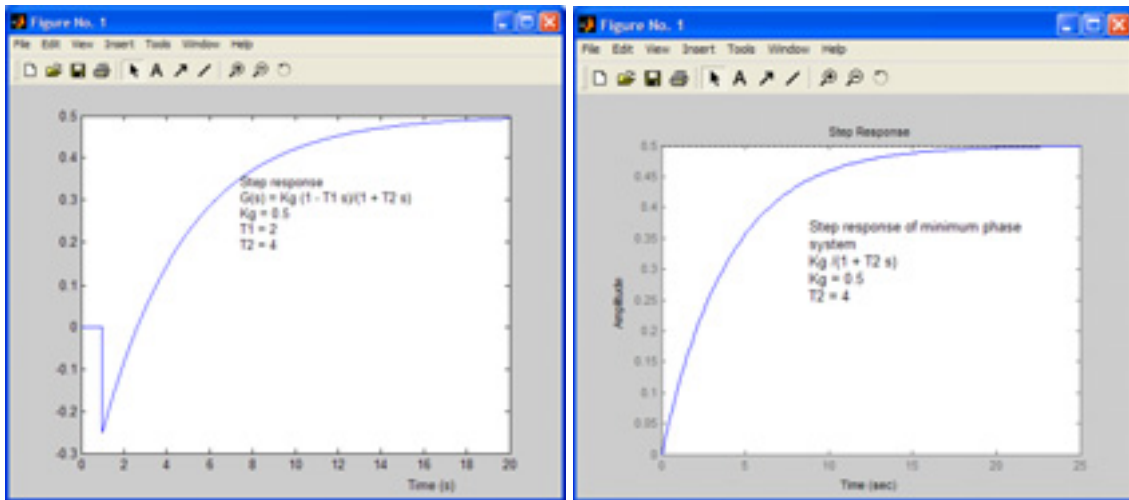
Avvikelsen $e(t)$ mellan börvärdet och ärvärdet påverkar regulatorns proportionella och integrerande funktion och summan av dessa funktioner utgör regulatorns utsignal $m(t)$, se Figur 1.5. En stegtest med regulatorns börvärde ökar momentant såväl felsignalen $e(t)$ som $m(t)$. Den sistnämnda storheten styr sedan utsignalen $y(t)$ mot sitt slutvärde. Så länge som felsignalen $e(t)$ är positiv kommer integratorns utsignal och därmed också $m(t)$ att växa till dess att utsignalen $y(t)$ är lika med börvärdet $u(t)$.

Det geniala med regulatorns integrerande egenskap är att det stationära felet mellan bör- och ärvärde blir noll. Nyttjas inte integrationen utan enbart regulatorns P-del erhålls en stationär avvikelse mellan bör- och ärvärde i detta fall.

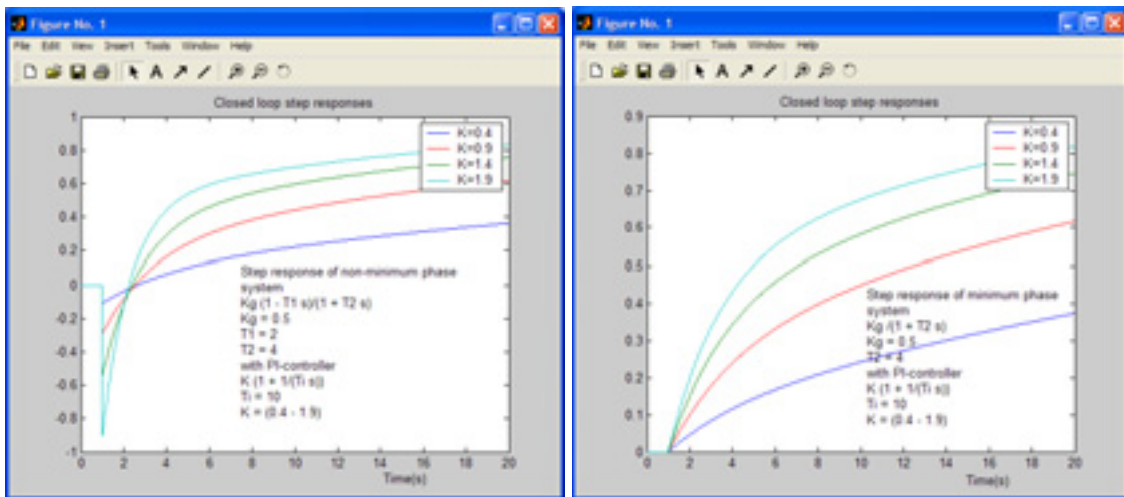
Det högra diagrammet i Figur 1.4 visar $y(t)$ vid stegtest med börvärdet $u(t)$ för system $G(s)$, där $G(s)$ är av typen minimumfas. Se uppgifterna i diagrammet. Regulatorns integrationstid $T_i = 10$ s och stegsvar har genomförts när dess förstärkning k varierats från 0.4 till 1.9. Utsignalens slutvärde för $y(t) = 1$ är det samma i samtliga simuleringsfall. Stegsvaren visar att utsignalen växer snabbare mot slutvärdet $y(t) = 1$ ju högre förstärkning regulatorn har.

Det vänstra diagrammet i Figur 1.4 visar utsignalen $y(t)$ vid stegtest med börvärdet $u(t)$ för systemet $G(s)$, där $G(s)$ är av typen icke minimumfas. Uppgifter på parametrar som använts vid simuleringen visas i diagrammet. Slutvärdet för utsignalen $y(t) = 1$ i samtliga fall även vid reglering av systemet med icke minimumfasdynamik. Figuren visar också att responsen är snabbare när förstärkningen höjs hos regulatorn. Dessutom

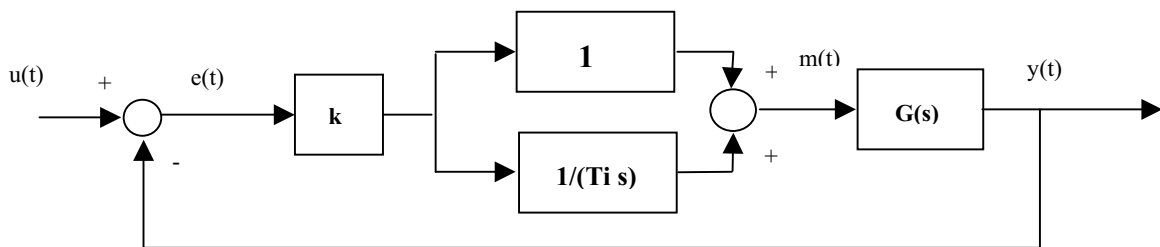
visar kurvorna att icke minimumfasegenskapen finns kvar även när systemet $G(s)$ styrs av regulatorn – stegsvaret går åt fel håll initialt. Graferna visar också att den negativa undersvingen blir större när förstärkningen och därmed snabbheten hos regleringen ökar. Icke minimumfasegenskapen hos systemet begränsar följaktligen reglermöjligheten.



Figur 1.3 Stegsvär med ett icke minimumfssystem presenteras i vänster diagram. Stegsvär med ett motsvarande minimumfssystem framgår av höger diagram.



Figur 1.4 PI-reglering av icke minimumfssystem presenteras i vänster diagram. Stegsvär med regulatorns förstärkning $K = 0.4 - 1.9$. Det högra diagrammet visar motsvarande PI-reglering av minimumfssystem.



Figur 1.5 En process med överföringsfunktionen $G(s)$ styrd av en PI-regulator med förstärkningen k och integrationstiden T_i . Regulatorns börvärde är $u(t)$, felsignalen $e(t)$, styrsignalen $m(t)$ och den reglerade processtorheten $y(t)$.

1.2 Integratoruppvridning

En PI-regulator som används i ett reglersystem har till uppgift att styra processens ställning så att det blir överensstämmelse mellan regulatorns börvärde och ärvärde. Här har integralfunktionen hos regulatorn en väsentlig uppgift som redan diskuterats i Kapitel 1.1.

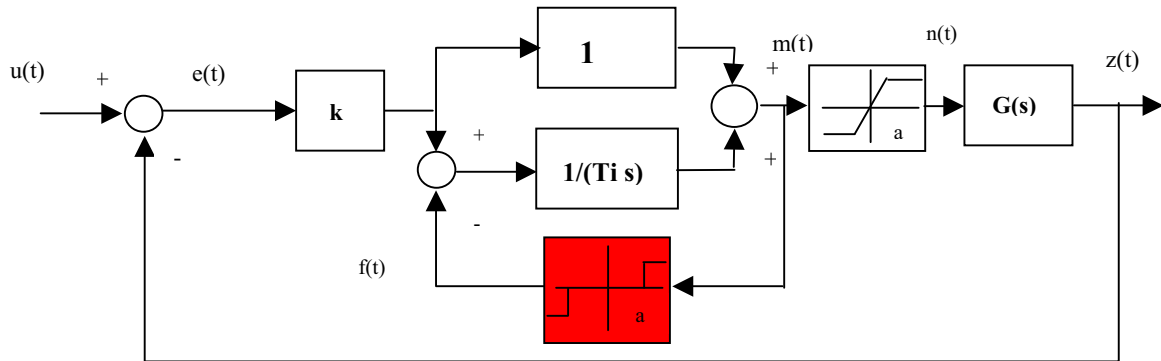
Regulatorns integralfunktion har dock en nackdel som benämns integratoruppvridning och som blir påtaglig i system där det förekommer begränsningar. Figur 1.6 visar hur integratoruppvridningen uppstår och hur den kan förhindras. Den engelskspråkiga benämningen för integratoruppvridning är *windup* och förhindrad integratoruppvridning *reset windup*.

Som ett första steg försummar vi inflytandet från det röda blocket i Figur 1.6. Regulatorns börvärde $u(t)$ jämförs med den reglerade storheten $z(t)$ och skillnaden bildas som har benämningen $e(t)$ i figuren. Via PI-regulatorns förstärkning och integration åstadkoms utsignalen $m(t)$ från regulatorn. Processens överföringsfunktion $G(s)$ styrs sedan av regulatorns utsignal $m(t)$ så länge som $-a < m(t) < a$. När styrsignalen $m(t)$ från regulatorn antar värden utanför detta intervall så sker en begränsning hos styrsignalen $n(t)$ som är insignal till $G(s)$, se blocket med begränsning i Figur 1.6. Detta innebär att även om regulatorns utsignal $m(t)$ växer kommer inte $n(t)$ att växa.

Anta nu för ett ögonblick att börvärdet vid stegstörning ökar utöver det som motsvarar begränsningen a . Detta innebär att $m(t)$ är större än a medan $n(t)$ är lika med begränsningen. I detta läge börjar utsignalen från regulatorns integrator att öka eftersom felsignalen $e(t)$ är positiv. På grund av den efterföljande begränsningen har integratorns ökande utsignal som ingår i $m(t)$ inte någon extra påverkan på signalen $n(t)$. Integratorn håller sedan på att öka sin utsignal så länge som felsignalen $e(t)$ är positiv. När slutligen felsignalen blir noll och sedan negativ så är integratorn kraftigt uppvriden så att det dröjer innan regulatorns utsignal reducerats till området inom begränsningarna. Detta leder i sin tur till transienter hos reglersystemets dynamik.

Det är denna integratoruppvridning som är problemet. I princip gäller det att stoppa integratorns utsignal så fort $m(t) > a$ i Figur 1.6. Det finns flera sätt att åstadkomma detta på. Ett av sätten har beskrivits i Referens 8. En återkoppling internt i regulatorn reducerar insignalen till integralfunktionens ingång så att den blir negativ, se det röda blocket i Figur 1.6. Detta leder till att integralen minskar och så snart $m(t)$ reducerats till nivån a upphör funktionen hos återkopplingen. På detta sätt kommer $m(t)$ att svänga omkring a och förhindra uppvridningen. För övrigt, det vill säga inom det linjära området, fungerar regulatorn som en vanlig PI-regulator utan integratoruppvridning.

Ofta har kommersiella regulatorer funktioner som förhindrar integratoruppvridning. Men det viktiga är att funktionen är korrekt justerad med hänsyn till reglersystemets egenskaper. Det är också viktigt att betona att den förvärrade dynamiken orsakad av integratoruppvridning främst visar sig när systemet utsätts för transienter.



Figur 1.6 Återkopplat system med PI-regulator som förhindrar integratoruppvridding.

1.2.1 Exempel med integratoruppvridding

Ett reglersystem enligt Figur 1.6 förutsätts i detta simuleringsexempel. Det återkopplade systemet har följande parametrar:

$$k = 1, T_i = 0.5 \text{ sekund}$$

$$n(t) = 10 m(t) \text{ när } |m(t)| < 0.1$$

$$n(t) = 1 \text{ när } m(t) > 0.1$$

$$n(t) = -1 \text{ när } m(t) < -0.1$$

$$G(s) = 1/(sT + 1), \text{ där } T = 0.1 \text{ sekund}$$

Den olinjära återkopplande länken, rött block i Figur 1.6, som förhindrar integratoruppvridding har följande egenskaper:

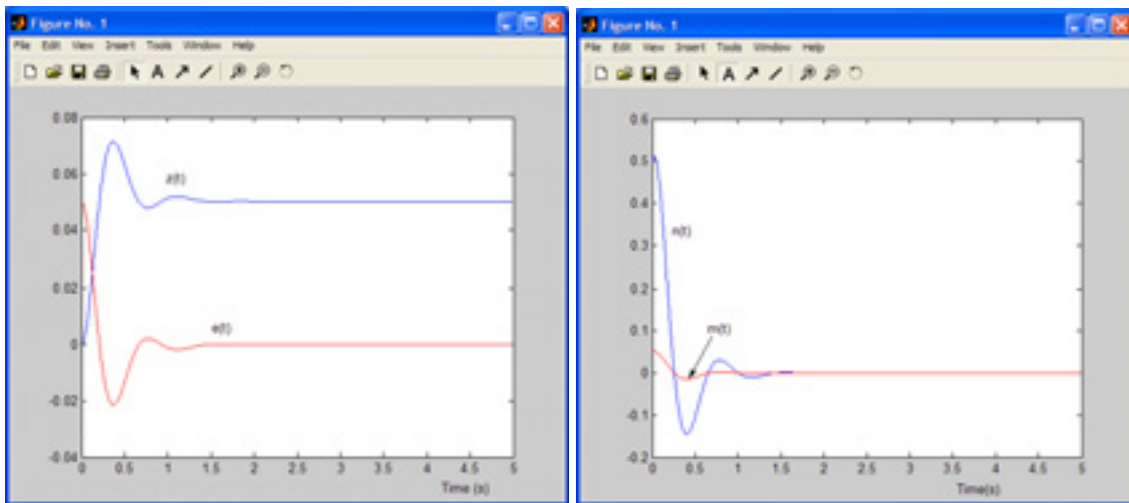
$$f(t) = 0 \text{ när } |m(t)| < 0.1$$

$$f(t) = 2 \text{ när } m(t) > 0.1$$

$$f(t) = -2 \text{ när } m(t) < -0.1$$

Simuleringsresultat med liten amplitud

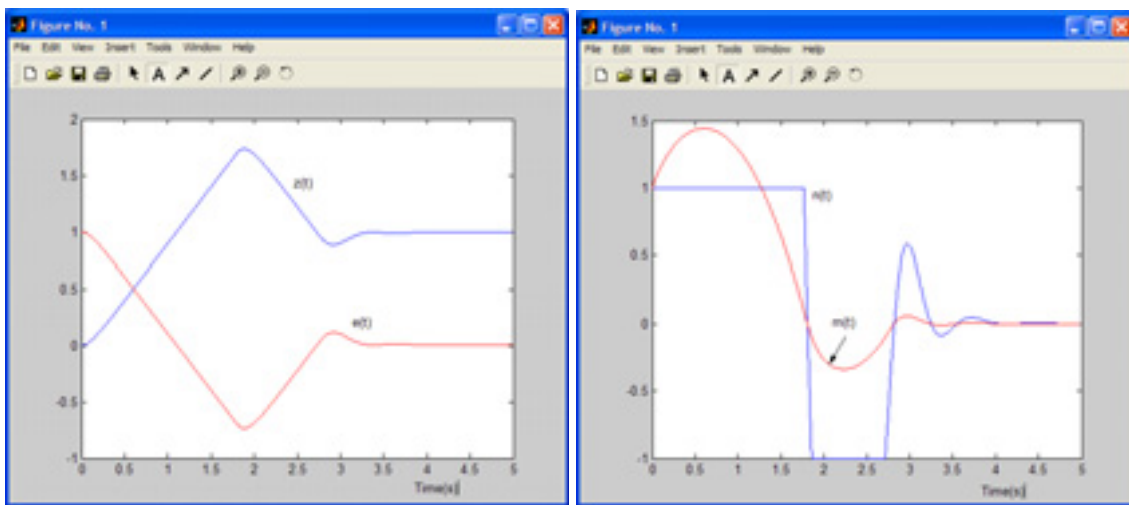
Stegsvarstest med reglersystemet genomförs med steget $u(t) = 0.05$. Denna signal ger en prompt ökning av $m(t=0) = 0.05$ och eftersom denna signal ligger inom det linjära området för den efterföljande olinjära länken så blir $n(t=0) = 0.5$. Dessa begynnelsevärden framgår av det högra diagrammet i Figur 1.7. Därefter sker insvängningsförloppet. Utsignalen $z(t)$ och felsignalen $e(t)$ visas i vänster diagram i Figur 1.7. Bägge diagrammen i Figur 1.7 visar att signalerna rör sig inom det linjära området samt att insvängningen sker förhållandevis snabbt efter en mindre översläng hos utsignalen $z(t)$. Efter cirka 1.5 sekunder har stationära förhållanden uppnåtts hos regleringen.



Figur 1.7 Stegsvär med $U_{ref} = 0.05$. Samtliga signaler är inom det linjära området för regulatorn och processen.

Simuleringsresultat med stor amplitud med integratoruppvridding

Stegsvarstest med steget $u(t) = 1$ för det återkopplade reglersystemet presenteras i Figur 1.8. Denna insignal ger en prompt ökning av $m(t=0) = 1$. Eftersom den efterföljande olinjära överföringsfunktionen är begränsad så blir dess utsignal $n(t=0) = 1$, se höger diagram i Figur 1.8. Detta leder i sin tur till integratoruppvridding, det vill säga att regulatorns integrerande funktion, utgången till blocket $1/T_i$ s växer. Trots att integratorns utsignal växer så sker inte någon extra påverkan på blocket $G(s)$ eftersom det olinjära blocket redan har den begränsade signalen $n(t) = 1$. Det kompletta stegsvaret $z(t)$ och felsignalen $e(t)$ visas i vänster diagram i Figur 1.8. Resultatet blir ett insvängningsförlopp med högre amplitud och som pågår klart längre tid än insvängningen som skedde inom det linjära området där integratoruppvriddingen inte förekom, se Figur 1.7 och 1.8.



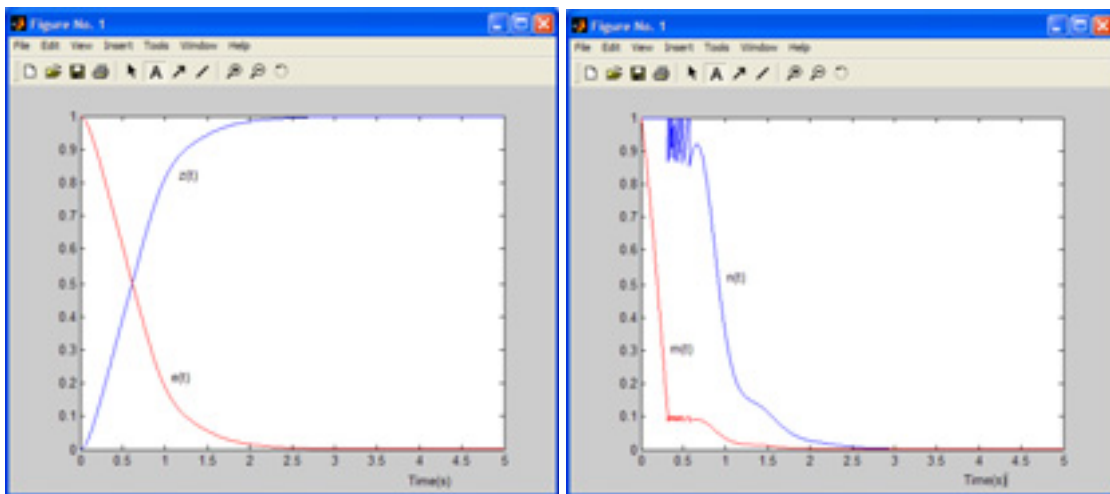
Figur 1.8 Stegsvaer med $U_{ref} = 1$. Signalerna är utanför det linjära området och integratoruppvridding sker utan att åtgärdas av den röda olinjära återkopplingen i Figur 1.6.

Simuleringsresultat med stor amplitud med hinderfunktion för integratoruppvridning

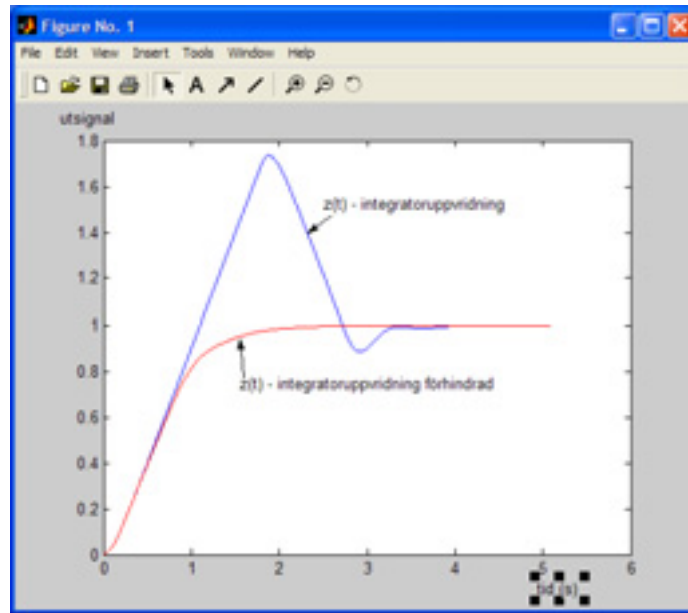
Stegsvarstest med steget $u(t) = 1$ presenteras i Figur 1.9. Initialt så blir $m(t=0) = 1$ och därmed så tillförs insignalen till integratorn termen -2 och därför sker minskningen av $m(t)$ i det högra diagrammet i Figur 1.9. Resultatet blir ett klart snabbare insvängningsförlopp som dessutom i detta fall saknar översläng. Detta erhålles när integratoruppvridningen förhindras.

Sammanfattningsvis kan man säga att reglersystemet uppträder med olika dynamik vid små störningar och stora störningar som överträder de olinjära begränsningarna. Det är större amplitud och tydligt längre insvängningsförlopp på grund av integratoruppvridningen när stegstörningen är utanför det linjära området i exemplet. Figur 1.10 sammanställer simuleringsresultaten med och utan förhindrad integratoruppvridning. Det är uppenbart att stegsvaret ger ett förlopp utan översväng när integratoruppvridningen förhindras av regulatorns logik.

Av detta exempel kan man dra slutsatsen att det är viktigt att regulatorn har logik för att förhindra integratoruppvridning och att den programmerats för de begränsningar som finns i reglersystemet. Det är också värt att upprepa att integratoruppvridningen inte utgör något problem vid snälla transienter. Det är när de stora transienterna kommer som den förhindrade integratoruppvridningen gör stor skillnad.



Figur 1.9 Stegsvaer med $U_{ref} = 1$. Signalerna får ett reglerförlopp utan besvärade transienter när integratoruppvridningen förhindras med det röda olinjära blocket i Figur 1.6.

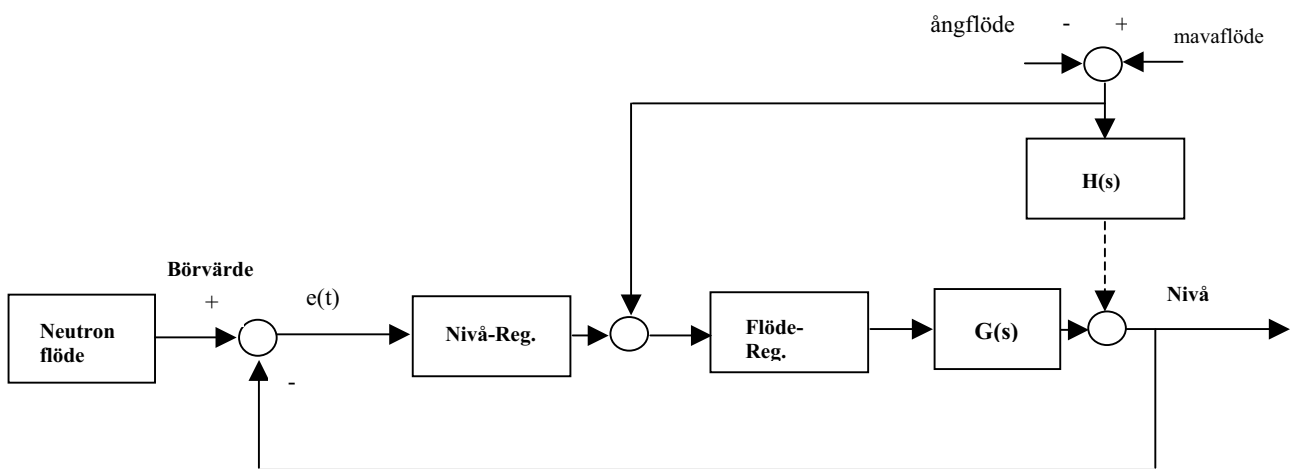


Figur 1.10 Sammanfattning av stegsvarstest med och utan hinder för integratoruppvidning. Steghöjden = 1.

1.3 Framkoppling

Matarvattenregulatorns uppgift är att hålla konstant nivå i ånggeneratoren. Detta åstadkoms genom att mäta vattennivån och styra matarvattenflödet till ånggeneratoren. Nu förekommer det emellertid störningar i processen som leder till att nivån snabbt kan förändras. En typisk störning är en snabb förändring hos ångflödet. Detta kommer på sikt att leda till en nivåförändring som kommer att åtgärdas av nivåreglersystemet.

Det reglertekniskt intressanta med störningarna i vattennivån i ånggeneratoren är att de är mätbara, såväl matarvattenflödet som ångflödet mäts. En övergripande beskrivning av nivåregleringen i Ringhals 3 ges i Figur 1.11. Figuren visar att skillnadssignalen mellan matarvattenflödet och ångflödet ger en fysikalisk påverkan på nivån i ånggeneratoren. Denna påverkan sker via den överföringsfunktion som benämns $H(s)$ i figuren. Framkopplingen sker nu genom att skillnadssignalen mellan flödena adderas till nivåregulatorns utsignal. På så sätt kommer flödesregulatorn för matarvattnet att få ett justerat flödesbörvärde, se Figur 1.11. Konstruktionen med framkoppling nyttjas för att åstadkomma en nivå som varierar så lite som möjligt. Konstruktionen med framkopplingen kräver dock anpassning till processdynamiken för att fungera på ett bra sätt.

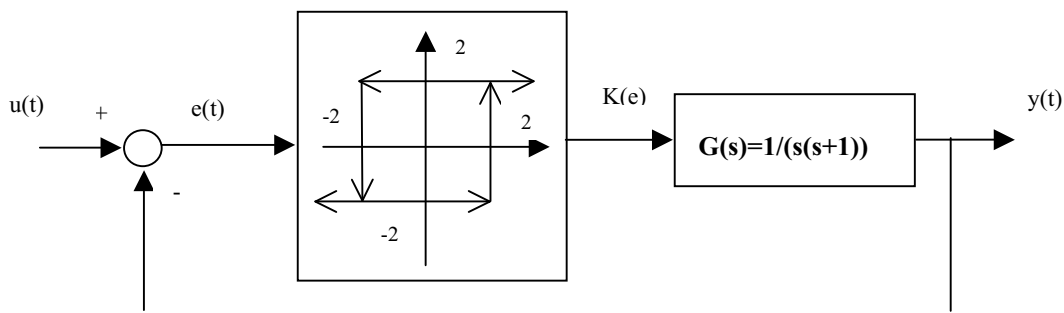


Figur 1.11 Förenklat blockschema för nivåregleringen i en ånggenerator i Ringhals 3

1.4 Limit cycle-svängning

En *limit cycle*-svängning i ett återkopplat system sker med konstant amplitud. En störning som tillfälligt reducerar eller ökar svängningens amplitud återställs av det återkopplade systemets dynamik till den så kallade *limit cycle*-amplituden. Svängningen sker alltså med stabil amplitud som i sin tur bestäms av det återkopplade systemets parametrar. Viktigt att notera är också att *limit cycle*-svängningar endast kan förekomma i olinjära system.

En vanligt förekommande olinjäritet i mekaniska system är hysteres. Ett reglertekniskt exempel med ett relä med hysteres framgår av Figur 1.12. Felsignalen $e(t)$ är insignal till en komponent med hysteres. När insignalen ökar från exempelvis $e(t) = -3$ så är utsignalen $K(e) = -2$ till dess att $e(t)$ är större än 2, då sker ett omslag så att $K(e) = 2$. Signalnivån $K(e) = 2$ bibehålles till dess att $K(e) < -2$, då sker ett omslag så att $K(e) = -2$. Hysteresen hos reläfunktionen återges grafiskt i blockdiagrammet för reglersystemet i Figur 1.12. Utsignalen från reläfunktionen $K(e)$ kommer att styra överföringsfunktionen $G(s) = 1/(s(s+1))$.



Figur 1.12 Olinjärt reglersystem med hysteres.

För enkelhetens skull antar vi $u(t) = 0$ och därmed blir utsignalen $y(t) = -e(t)$. Detta innebär att $-e(t) = G(s) K(e(t))$. Följande ekvation erhålls då uttryckt i Laplace-operatorn s :

$$-s^2 e(t) - s e(t) = K(e(t))$$

Denna ekvation motsvarar följande differentialekvation eftersom $s e(t) = de(t)/dt$, och $s^2 e(t) = d^2e/dt^2$:

$$d^2e/dt^2 + de/dt + K(e) = 0$$

där $K(e) = -2$ när $e < -2$ eller $e < 2$ och $de/dt > 0$

$$K(e) = 2$$
 när $e > 2$ eller $e > -2$ och $de/dt < 0$

Genom att välja tillståndsvariablerna $x_1 = e$ och $x_2 = de/dt$ kan tillståndsekvationerna formuleras:

$$dx_1/dt = x_2$$

$$dx_2/dt = -x_2 - K(x_1)$$

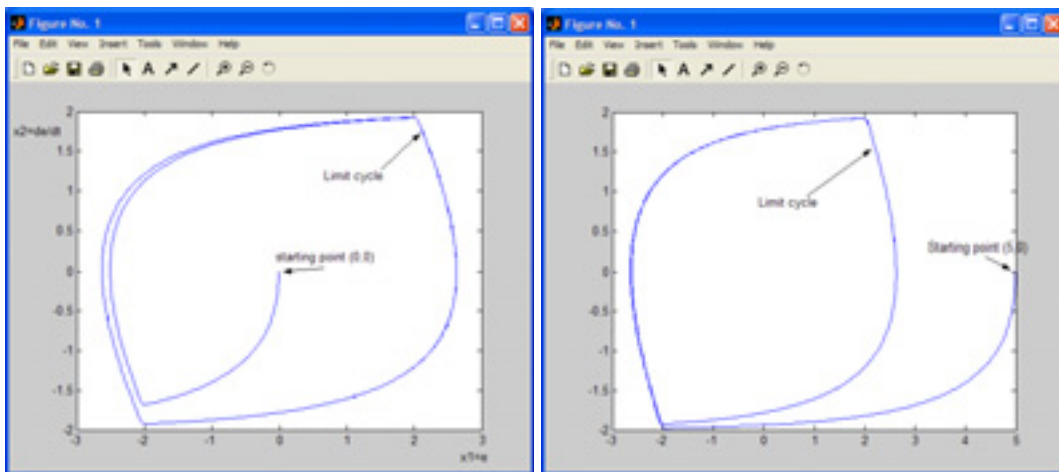
där $K(x_1) = -2$ när $x_1 < -2$ eller ($x_1 < 2$ och $dx_1/dt > 0$)

$$K(x_1) = 2$$
 när $x_1 > 2$ eller ($x_1 > -2$ och $dx_1/dt < 0$)

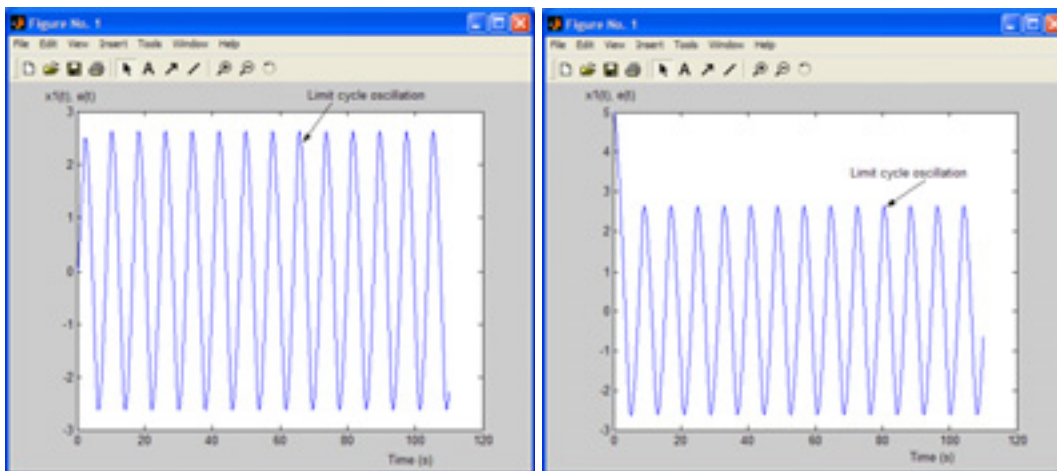
Fasporträttet $x_2 = f(x_1)$ för dessa ekvationer visas i Figur 1.13. Reglersystemet uppvisar stabila periodiska svängningar – *limit cycles*. Den vänstra grafen i Figuren 1.13 visar tillväxten i amplitud när systemekvationerna ges startvärdet $x_1 = x_2 = 0$. Motsvarande tidsfunktion för $x_1(t)$ visas i vänster diagram i Figur 1.14. Amplituden växer mycket snabbt till *limit cycle*-nivån och förblir sedan konstant.

Den högra grafen i Figur 1.13 visar hur amplituden reduceras när tillståndsekvationerna ges startvärdet $x_1 = 5$ och $x_2 = 0$. I detta fall reduceras amplituden på ett stabilt sätt ner till *limit cycle*-nivån, se höger diagram i Figur 1.13 och 1.14. Figur 1.15 visar vad som händer när hystereseens parametrar ändras. De röda kurvorna visar oscillationen när omslaget sker vid det ursprungliga värdet ± 2 medan de blå kurvorna i figuren visar oscillationen vid omslaget ± 0.2 . Det är uppenbart att när hystereseen minskar från ± 2 till ± 0.2 så reduceras svängningsamplituden från 2.6 till 0.5 i detta specifika fall, se Figur 1.15.

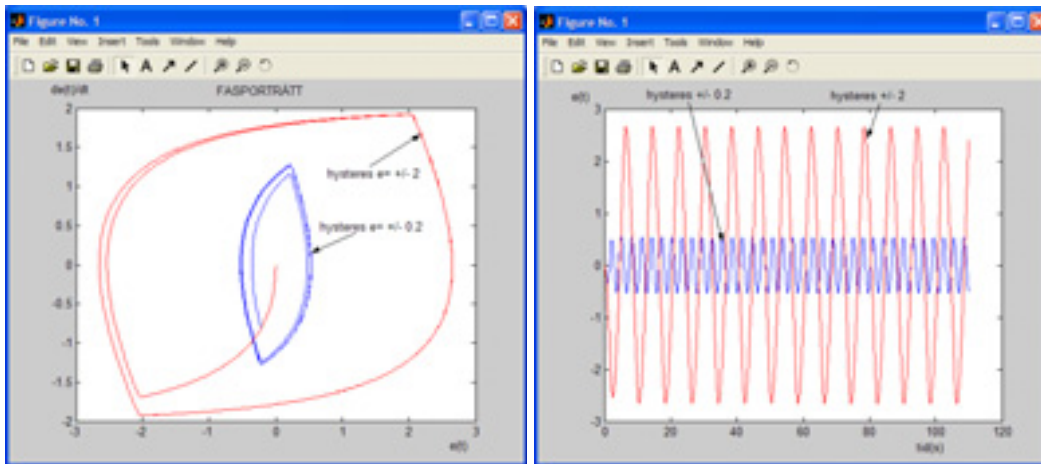
Exemplet visar med all tydlighet att ett reglersystem med hysteresis kan innebära *limit cycle*-svängningar. Amplitudens storlek beror på hystereseens parametrar och systemdynamiken.



Figur 1.13 Det vänstra diagrammet visar fasporträttet för det olinjära regelsystemet med startpunkten $x_1=0$ och $x_2=0$. Det högra diagrammet visar fasporträttet när $x_1=5$ och $x_2=0$.



Figur 1.14 Det vänstra diagrammet visar $e(t)$ som funktion av tiden (limit cycle) efter uppstart när $e = 0$ och $de/dt = 0$ som motsvarar insvängningen i vänstra diagrammet i figuren ovan. Den högra figuren visar motsvarande förlopp efter uppstart med $e = 5$ och $de/dt = 0$ som motsvarar insvängningen i högra diagrammet i figuren ovan.



Figur 1.15 Fasporträtt för simulering med det återkopplade systemet i Figur 1.12 när hysteresens omslag sker vid $e(t)=\pm 2$ (röd kurva) och för omslag vid $e(t)=\pm 0.2$ (blå kurva). Amplituden hos felsignalen $e(t)$ minskar betydligt när hysteresen reduceras.

2 Matarvattenregleringen vid Ringhals 3

2.1 Beskrivning av regleringen vid effekter > 20 %

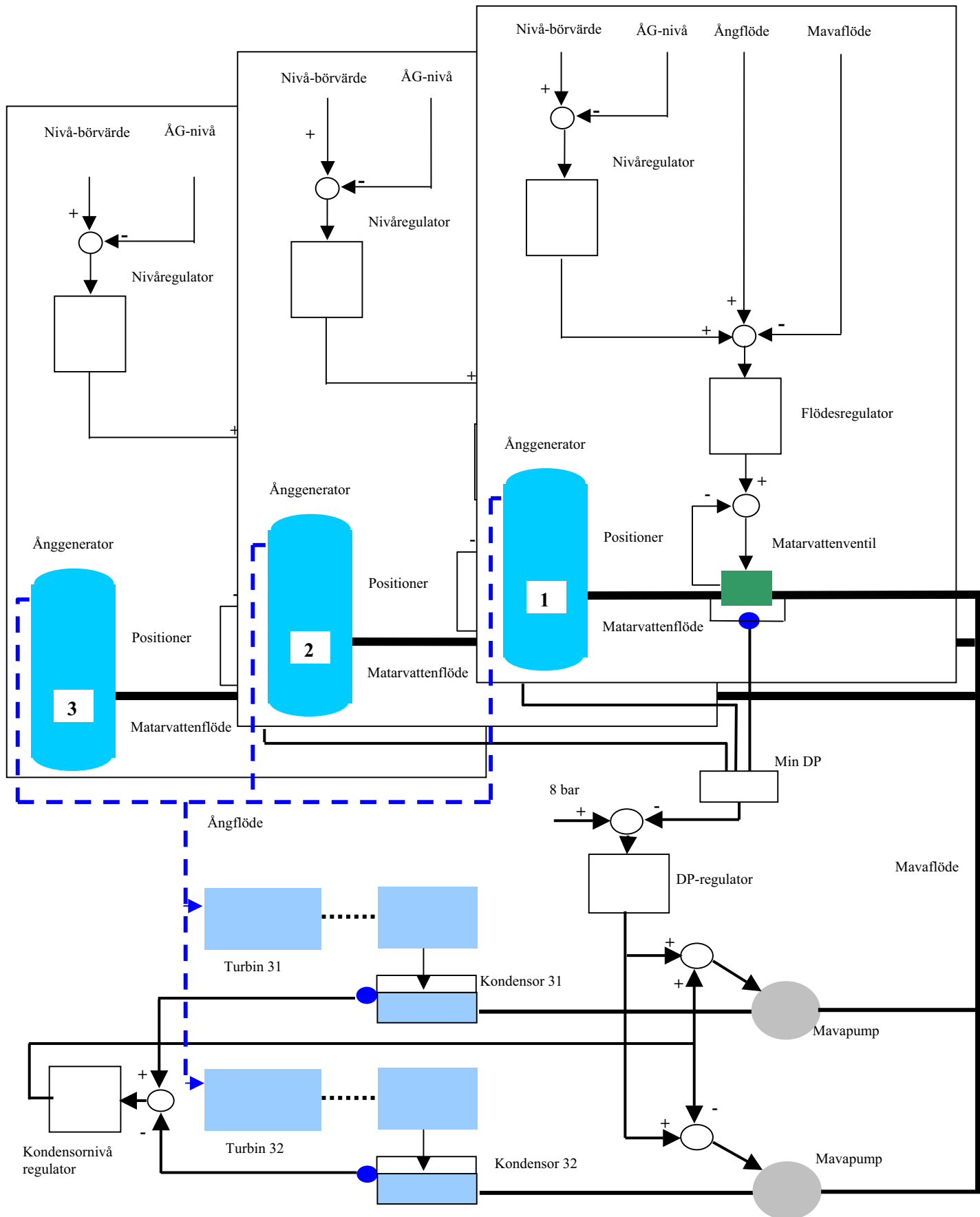
Ånggeneratoren är den komponent i en PWR som bildar gräns mellan reaktorns primär- och sekundärsystem. I ånggeneratoren genereras den ånga som driver turbinerna som slutligen driver generatorerna. Det vatten som finns i ånggeneratoren förångas av de heta tuberna och drivs som ånga genom turbinen för att sedan kondenseras i kondensorn och därefter pumpas tillbaka till ånggeneratoren. Vattnet drivs runt i kretsen i ett slutet system samtidigt som dess aggregationstillstånd växlar mellan ånga och vätska.

En övergripande bild av matarvattenregleringen i Ringhals 3 visas i Figur 2.1. Tre ånggeneratorer samt två turbiner ingår i de system som matarvattenregleringen omfattar. Målsättningen med matarvattenregleringen är att hålla konstant vattennivå i de tre ånggeneratorerna samtidigt som vattennivåerna i de bägge kondensornas regleras så att de stämmer överens med varandra.

Figur 2.1 visar att ångflödet från de tre ånggeneratorerna leds till de bägge turbinerna 31 och 32. Efter fullgjort arbete i turbinerna kondenseras ångan i respektive kondensorn. De två matarvattenpumparnas uppgift är nu att pumpa vatten så att differensstrycket 8 bar etableras över de tre matarvattenventilerna.

Figur 2.1 visar en sammanställd bild där tre nivåreglersystem var för sig styr sina individuella matarvattenventiler med målet att nivån i respektive ånggenerator överensstämmer med börvärdet.

Den nedre halvan av figuren visar att givarsignalerna för differensstrycket över matarvattenventilerna går till en instrumentkomponent som kallas min-väljare. Detta innebär att signalen med det lägsta DP-värdet återfinns på enhetens utgång. Denna signal utgör DP-regleringens ärvärde. DP-regulatorn har börvärdet 8 bar och dess utsignal påverkar matarvattenpumparnas varvtal via ett hydrauliskt system. Målet för detta reglersystem är att det lägsta DP-värdet över de tre matarvattenventilerna ska bli 8 bar. DP-regulatorns utsignal ökar eller minskar fördensskull pumpvarvtalet hos de bägge systemen med matarvattenpumpar. Eftersom Ringhals 3 driver två turbiner så återstår nu en reglering för vätskebalansen mellan Turbin 31 och 32, se Figur 2.1. Nivån i Kondensorn 31 jämförs med Kondensorn 32 och regulatorns utsignal adderas till styrsignalen för matarvattenpumpen som styr flödet från kondensorn 31. På liknande sätt subtraheras samma styrsignal innan den påverkar flödet från kondensorn 32.



Figur 2.1 Sammanställd förenklad bild av matarvattenregleringen vid Ringhals 3.

2.2 Reglering av matarvattenventilen med målet att uppnå föreskriven nivå i ånggeneratoren

Den individuella regleringen av nivån i Ånggenerator 1 framgår av Figur 2.2. Som framgår av figuren är reglermålet att styra matarvattenventilen så att vattennivån blir lika med nivåbörvärdet som i detta fall är 69 %, eftersom vi enbart behandlar nivåregleringen för effekter över 20 %. Två regulatorer samt en ”positioner” är verksamma i detta effektläge. Den överordnade regulatorn benämns nivåregulator och på dess ingång syns nivåbörvärdet och ÅG-nivån, se Figur 2.2. Nivåregulatorn är av typen PID med följande parameterinställningar enligt Ringhalsverket, se också Figur 2.4:

$$\text{PID}(s) = K_p + 1/(T_i s) + K_d s/(1 + T_d s)$$

där

$$K_p = 0.9$$

$$T_i = 200 \text{ sekunder}$$

$$K_d = 9$$

$$T_d = 5 \text{ sekunder}$$

s = Laplace-operatorm

Regulatorns integrerande egenskap leder till att regulatorns felsignal – avvikelser mellan börvärde och ärvärde – ger en växande utsignal hos nivåregulatorn, till dess att felsignalen blir noll. Regulatorns deriverande egenskap medför att en snabb förändring av börvärdet eller ärvärdet ger en snabb respons på regulatorns utgång.

För att öka drifttillgängligheten hos reglersystemet nyttjas tre olika nivågivare som bildar ärvärde för vattennivån. Detta sker i en instrumentenhet som benämns mittvärdesväljare. De tre nivåsignalerna är 30313LT474, 30313LT475 och 30313LT476 för ÅG-1. Mittvärdesväljarens utsignal är som namnet anger det mittersta av de tre som finns på dess ingång. Mittvärdesväljaren behåller följaktligen en korrekt nivåsignal även om en av de tre nivåsignalerna skulle upphöra att fungera.

Mittvärdesväljarens utsignal passerar ett lågpasfilter $G(s)$ med förstärkningen 1 och tidskonstanten $T = 5$ sekunder, varefter den utgör ärvärdessignal i nivåregulatorn. Denna signal har benämningen 30313LR478 för ÅG-1.

Nivåregulatorns utsignal utgör börvärde till den så kallade flödesregulatorn, se Figur 2.2. Regleringen av matarvattenflödet kompenseras med framkoppling för att reducera variationerna hos vattennivån i ånggeneratoren. Framkopplingssignalen utgörs av skillnaden mellan ångflödet och matarvattenflödet. När regleringen är i statisk balans och nivån i ånggeneratoren är konstant så överensstämmer ång- och matarvattenflödet. En störning som leder till momentant ökande ångflöde kommer på sikt att reducera nivån i ånggeneratoren. I detta läge kommer framkopplingssignalen att öka eftersom ångflödet blir större än matarvattenflödet. Detta leder till ett ökat pådrag av matarvatten av flödesregulatorn innan nivån börjar sjunka i ånggeneratoren, se Figur 2.2. Framkopplingen leder följaktligen till mindre avvikelser från börvärdet hos vattennivån i ånggeneratoren.

Signalen för ångflöde utgör ett medelvärde av transmittersignalerna 30313FT474 och 30313FT475 för ÅG-1, se Figur 2.2. Signalen för matarvattenflöde för samma ånggenerator utgör medelvärde av signalerna 30313FT476 och 30313FT477. Den benämns 30313FR478 i Figur 2.2.

Flödesregulatorn är av typen PI med följande parametrar enligt uppgift från Ringhalsverket, se också Figur 2.4:

$$PI(s) = K_p + 1/(T_i s)$$

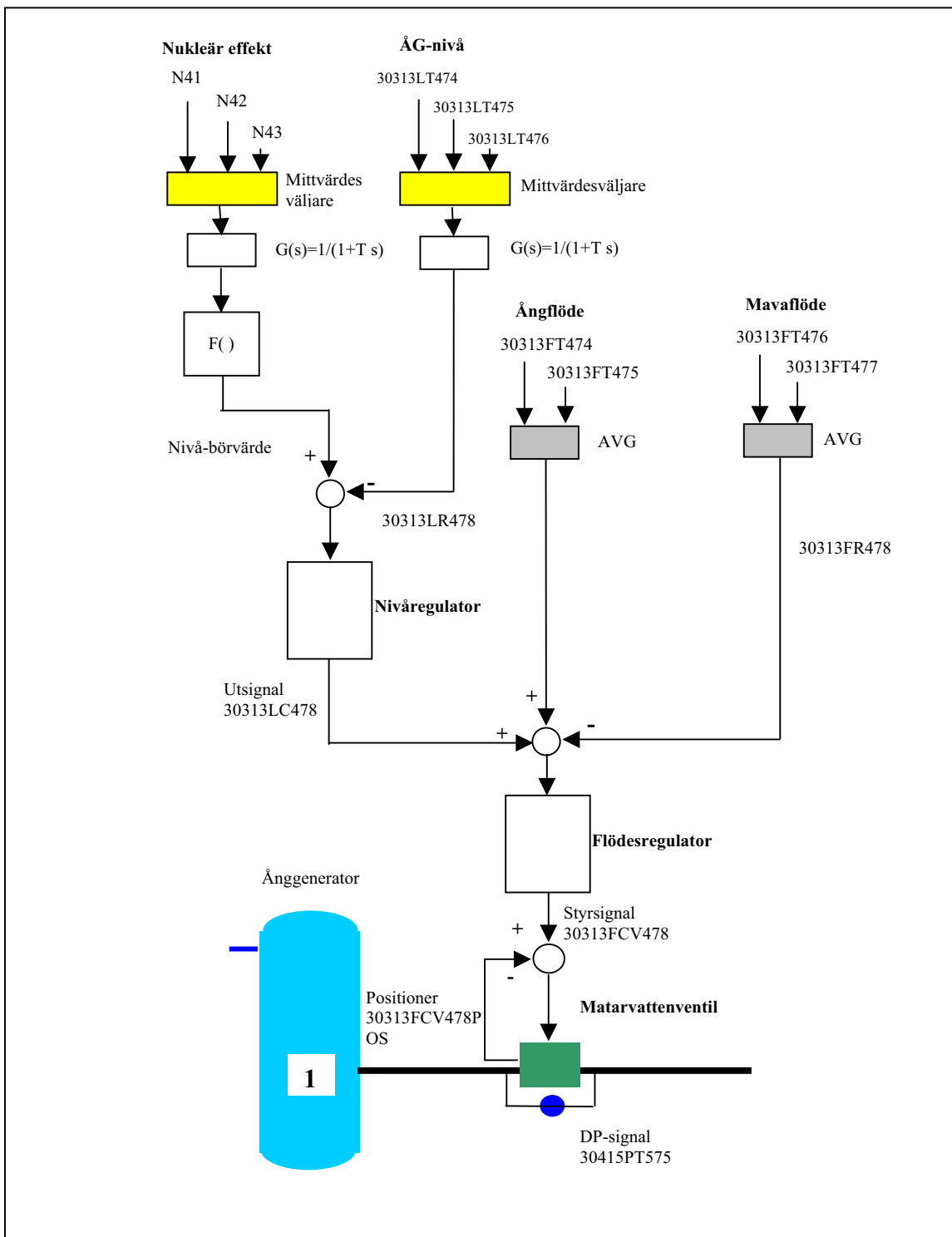
där

$$K_p = 0.239$$

$$T_i = 8.35 \text{ sekunder}$$

s = Laplace-operatorm

Utsignalen från flödesregulatorn styr matarvattenventilen. Signalen har benämningen 30313FCV478. Därmed skulle reglersystemet för matarvattenflödet kunna vara beskrivet, men så är inte fallet. Av Figur 2.2 framgår det att ventilen för matarvattenflödet har en intern återkoppling, en så kallad ”*positioner*”. En *positioner* är ett lokalt återkopplat system där ventilens positionssignal i form av ärvärde jämförs med styrsignalen för ventilen som dess börvärde. Avvikelsen mellan signalen påverkar sedan ventilen så att ventilens position justeras till överensstämmelse med börvärdessignalen. Konstruktionen är så utformad att börvärdet och ärvärdet väsentligen överensstämmer åtminstone när förändringarna hos börvärdet är långsamma. *Positionern* har reglersystemets fördel att eliminera inverkan av störningar på ventilinställningen från matarvattenflödet som annars skulle kunna inträffa. *Positioner*-signalen – eller annorlunda uttryckt ventilläget – har benämningen 30313FCV478POS för ÅG-1, se Figur 2.2.



Figur 2.2 Nivåregleringen för ÅG-1 vid Ringhals 3.

2.3 Reglering av DP-trycket över matarvattenventilerna

Regleringen av differenstrycket över matarvattenventilerna framgår av Figur 2.3. Börvärdet, det vill säga det önskade differenstrycket över matarvattenventilerna, är 8 bar för denna regulator. Blockdiagrammet visar att ärvärdessignalen evalueras som minimivärdet (Min) av de med transmitttrar registrerade differenstrycken i anläggningen. Differenstrycken har signalnamnen 30415PT575, 30415PT585 och 30415PT595 för respektive ÅG-1, ÅG-2 och ÅG-3.

Funktionsblocket (Min) är en i grunden olinjär komponent. Den kommer att byta insignal till regulatorn i enlighet med Min-funktionen. Den ånggenerator med lägst differenstryck över matarvattenventilen påverkar matarvattenpumparna via regulatorn. Som en konsekvens kommer de två övriga ånggeneratorerna att ha godtyckligt högre tryck över sina respektive ventiler. DP-regulatorns utsignal benämns 30537K801_56, se Figur 2.3. Regulatorn är av typen PI med följande parametrar, se också Figur 2.4:

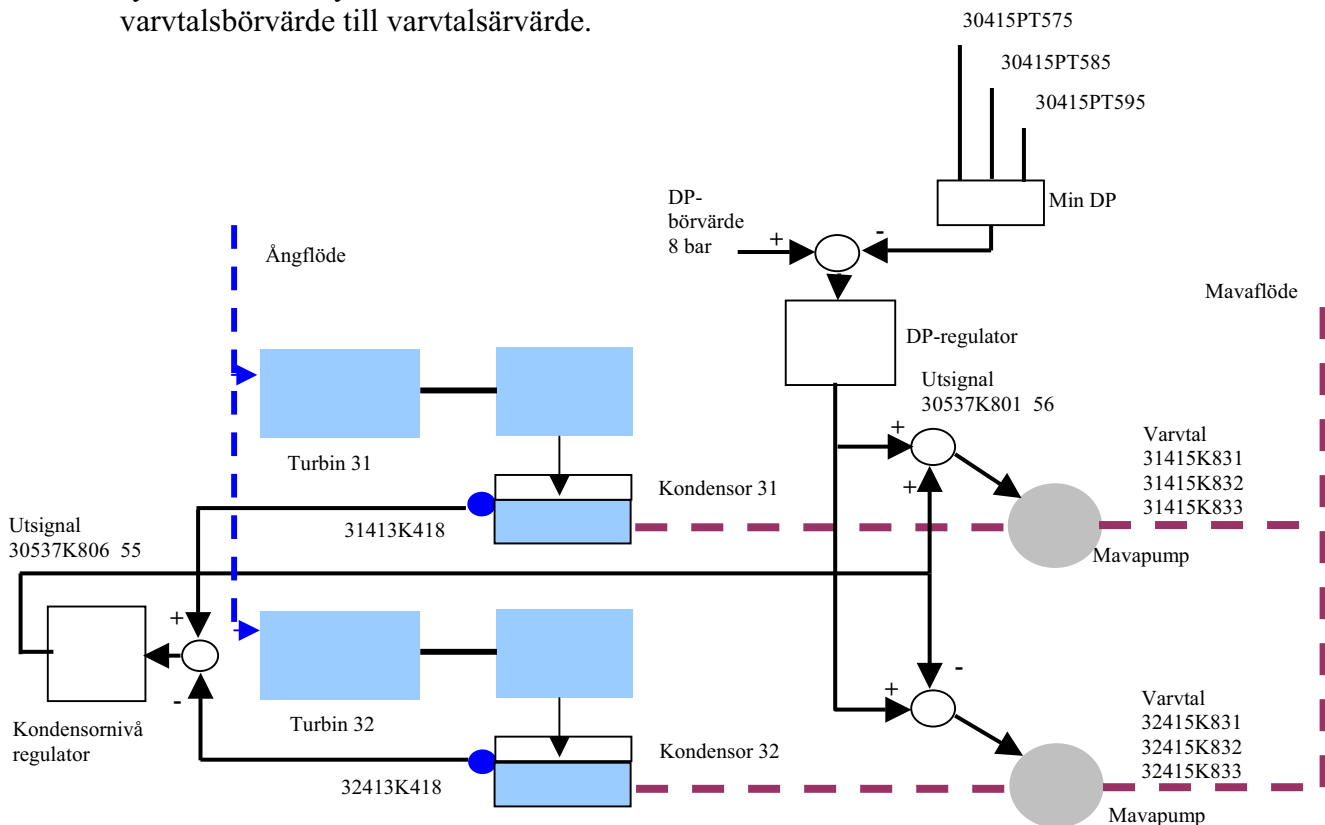
$$PI(s) = K_p + 1/(T_i s)$$

där

$$K_p = 0.67$$

$$T_i = 44.8 \text{ sekunder}$$

Utsignalen från DP-regulatorn påverkar styrningen av varvtalet på matarvattenpumparna för såväl turbin 31 som 32 efter korrektion av kondensornivåregulatorn. Styrningen av pumparnas varvtal sker via ett hydrauliskt system med en dynamik som motsvarar tidskonstanten 15 sekunder registrerat från varvtalsbörvärde till varvtalsärvärde.



Figur 2.3 DP- och Kondensorregeringen vid Ringhals 3.

2.4 Kondensornivåregleringen

Ångan passerar som redan nämnts turbinerna och kondenseras därefter i kondensorer. De två kondensorer är instrumenterade med nivågivare med signalbeteckningarna 31413K418 och 32413K418 för kondensator som tillhör turbin 31 respektive 32.

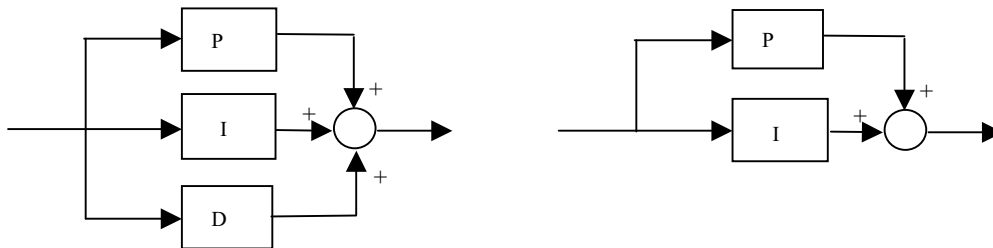
Eftersom nivån i kondensorn kan variera så behövs en regulator som kan justera nivåerna sinsemellan så att inte den ena kondensorn blir fylld och den andra får låg nivå. Detta är kondensornivåregleringens uppgift. Insignalen till kondensornivåregulatorn utgörs av skillnaden mellan nivåerna: Kondensator 31:s nivå minus Kondensator 32:s nivå. Antag att det är högre nivå i Kondensator 31 än i Kondensator 32. Detta leder till en ökande utsignal hos kondensornivåregulatorn som därmed ökar varvtalet (+ tecken) på matarvattenpumparna som tillhör Kondensator 31 och minskar motsvarande varvtal (- tecken) hos pumparna för Kondensator 32. På detta sätt sker en utjämning av vattennivåerna i de bägge kondensorer. Regulatorn är av typen PI med följande parametrar, se också Figur 2.4:

$$PI(s) = K_p + 1/(T_i s)$$

där

$$K_p = 0.93$$

$$T_i = 200 \text{ sekunder}$$



$$P(s) = K_p \quad I(s) = 1/(T_i s)$$

$$D(s) = K_d s/(1 + T_d s)$$

$$PID(s) = K_p + 1/(T_i s) + K_d s/(1 + T_d s)$$

$$PI(s) = K_p + 1/(T_i s)$$

Figur 2.4 Blockscheman för PID- och PI-regulator samt de beteckningar som används i rapporten för PID(s) och PI(s)-funktionerna uttryckta i Laplace-operatör s.

3 Mätsignalerna

Mät signaler har registrerats i Ringhals 3 efter ombyggnaden av reglersystemet inför effekthöjningen. Ett stort antal signaler har samlats in och de som har speciellt intresse för matarvattenregleringen kommer att presenteras. En lista över signalnamn, deras funktion i anläggningen samt fysikalisk enhet återges i Tabell 1 i slutet av kapitlet. En stor del av dessa mätningar är speciellt intressanta eftersom de har genomförts under experiment. Mätkvalitén hos de insamlade signalerna är god och mätningarna innehåller föredömligt många redundanta mätsignaler. Nedan följer en beskrivning av mätfilerna m.a.p. mättillfälle och typ av prov:

R3Trnslastbortfall50.bin

Denna fil avser ett prov med lastbortfall från full effekt ner till 50 %, eller annorlunda uttryckt en transient övergång från drift med två turbiner vid fulleffekt ner till drift med enbart en turbin. Provet gjordes 2006-07-13 mellan klockslagen 12:59:46 och 13:16:58. Samplingsfrekvensen var 20 Hz.

R3StepLageffekt.bin

Filen med dess signaler har samlats in vid låg effekt (cirka 32.5 %) och samtidig stegformad 3 % ökning av nivåbörvärdet för matarvattenregulatorn. Så snart regleringen av den nya nivån etablerats så sker en sänkning av nivåbörvärdet till den ursprungliga nivån. Stegstörningarna genomförs för alla tre ånggeneratorer i sekvens efter varandra. Provet gjordes 2006-07-01 mellan klockslagen 03:27:39 och 03:53:22. Samplingshastigheten var 1 Hz.

R3Stepfulleffekt.bin

Mät signalerna har i detta fall registrerats vid full effekt (cirka 92.5 %) och samtidig stegformad 3 % sänkning av nivåbörvärdet för två av de tre ånggeneratorerna. När regleringen svängt in sig på den nya nivån så sker en motsvarande höjning av börvärdet till den ursprungliga nivån. Provet genomfördes 2006-07-12 mellan klockslagen 12:37:22 och 12:59:12. Samplingshastigheten var 1 Hz.

R3Dpsteg.bin

Mät signalerna i denna fil har registrerats samtidigt som driftpersonalen vid Ringhals 3 genomförde en ökning av börvärdet till DP-regulatorn. Efter det att det nya DP-värdet etablerats sker en sänkning till den ursprungliga nivån. Detta prov är viktigt för undersökningen av DP-regleringen. Effekten var cirka 92.5 % under provet. Registreringen som innehåller provet gjordes 2006-07-12 mellan klockslagen 12:37:22 och 12:59:12. Samplingshastigheten var 1 Hz.

R3Stabilfulleffekt.bin

Denna fil avser lugn fulleffektdrift utan inslag av störningar eller transienter. Effekten var cirka 92.5 % under mätningen. Registreringen gjordes 2006-07-12 mellan klockslagen 06:55:43 och 08:40:04. Samplingshastigheten var 10 Hz.

3.1 Mätsignalernas egenskaper

Eftersom mätdatafilen med lastbortfall ner till 50 % kommer att användas flitigt presenteras transienten med ett antal figurer i det följande. Mätningen pågår under cirka 16 minuter och i Figur 3.1-v (Figur 3.1-vänster) presenteras ångflödet som funktion av tiden. I början av registreringen är ångflödet omkring 500 kg/s för att sedan efter lastbortfallet reduceras till omkring 250 kg/s. Transienten innebär övergång från två-turbindrift till enturbindrift, se Figur 3.1-v. Två ångflödessignaler visas för varje ånggenerator. Namnkonventionen är 30313FT474, 30313FT475 för Ånggenerator 1, 30313FT484, 30313FT485 för Ånggenerator 2 och 30313FT494, 30313FT495 för Ånggenerator 3. Den näst sista siffran i signalnamnet (7, 8 eller 9) anger att signalerna gäller respektive för Ånggenerator 1, 2 eller 3. APSD¹ för samtliga ångflödessignaler visas i Figur 3.1-h (Figur 3.1-höger). Det är förhållandevis god överensstämmelse mellan de olika spektra.

Matarvattenflödet för Ånggenerator 1 visas i Figur 3.2-v. Diagrammet visar närmast identiska signaler. Matarvattenflödet reduceras från 500 kg/s i början av registreringen till cirka 250 kg/s efter halva mättiden, se Figur 3.2-v. Motsvarande signaler som gäller för matarvattenflödet till Ånggenerator 2 visas i Figur 3.2-h och för Ånggenerator 3 i Figur 3.3-v. Även matarvattenflödessignalerna till dessa två senast nämnda ånggeneratorer stämmer väl överens med varandra. APSD för dessa matarvattenflödessignaler överensstämmer, se Figur 3.3-h.

Nivåsignalerna för Ånggenerator 1 visas i Figur 3.4-v och Figur 3.4-h. För Ånggenerator 2 framgår nivåsignalerna i Figur 3.5-v och för Ånggenerator 3 i Figur 3.5-h samt i Figur 3.6-v. Nivåsignaler från en och samma ånggenerator stämmer väl överens med varandra, speciellt för låga frekvenser. En viss skillnad, cirka 2 % i statisk kalibrering, kan konstateras mellan de redundanta signalerna. Ett förhöjt brus kan observeras som tillfälliga spikar hos nivåsignalen 30313LT475, se den detaljerade kurvan i Figur 3.4-h.

Starkt förhöjt brus konstateras hos nivåsignalen 30313LT495 i Ånggenerator 3, se Figur 3.5-h. Den detaljerade kurvan i Figur 3.6-v visar en tydlig oscillation hos nämnda nivåsignal. Amplituden hos svängningen är cirka 4 % topp till topp. Svängningsfrekvensen varierar över tiden och den går mycket lågt i frekvens, se Figur 3.6-h som visar APSD för samtliga nivåsignaler i ånggeneratorerna. Av Figur 3.6-h framgår det att nivåsignalen 30313LT495 avviker i APSD redan vid 0.08 Hz.

Den avvikande nivåsignalen kan också studeras hos mätdatafilen *R3Stepfulleffekt.bin*, se Figur 3.7-v och Figur 3.7-h. Av det vänstra av dessa diagram framgår att oscillationen hos signalen 30313LT495 är intermittent – strax efter stegstörningen upphör signalen att svänga. Bedömningen är att denna transmitter bör bytas ut. I Kapitel 4 och 10 kommer vi att kommentera på vilket sätt den påverkar nivåregleringen.

Koherensen inbördes mellan de tre redundanta nivåsignalerna för Ånggenerator 2 och 3 framgår av Figur 3.8-v och Figur 3.8-h. Denna analys baseras på mätdata från lastbortfallet till 50 %. Det högra diagrammet som gäller för Ånggenerator 3 visar att de två kombinationer av signalpar som innehåller 30313LT495 har väsentligt lägre koherens än alla övriga signalpar. Också denna analys styrker påståendet att

¹ APSD = Auto Power Spectral Density

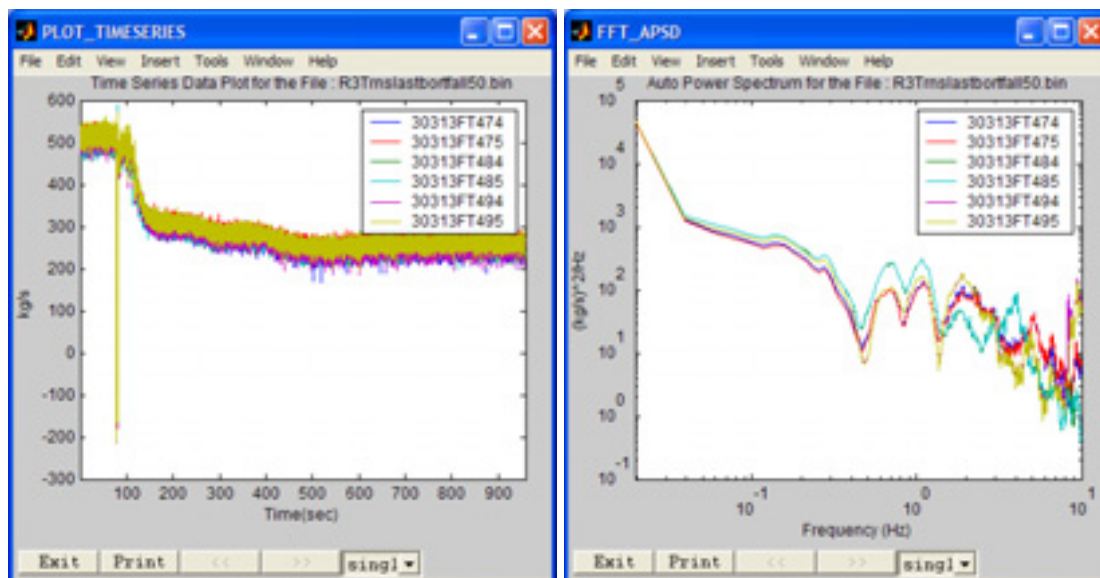
nivåsignalen 30313LT495 återger svängningar som inte finns hos nivån i Ånggenerator 3.

Figur 3.9-v presenterar differenstrycksignalerna över de tre matarvattenventilerna. Signalerna överensstämmer väl med varandra. De visar också att transienten med lastbortfall förmår differenstrycket att variera mellan 5 och 13 bar. En kraftig avvikelse från börvärdet för DP-regleringen som är 8 bar. Även APSD för DP-signalerna stämmer överens med varandra, se Figur 3.9-h.

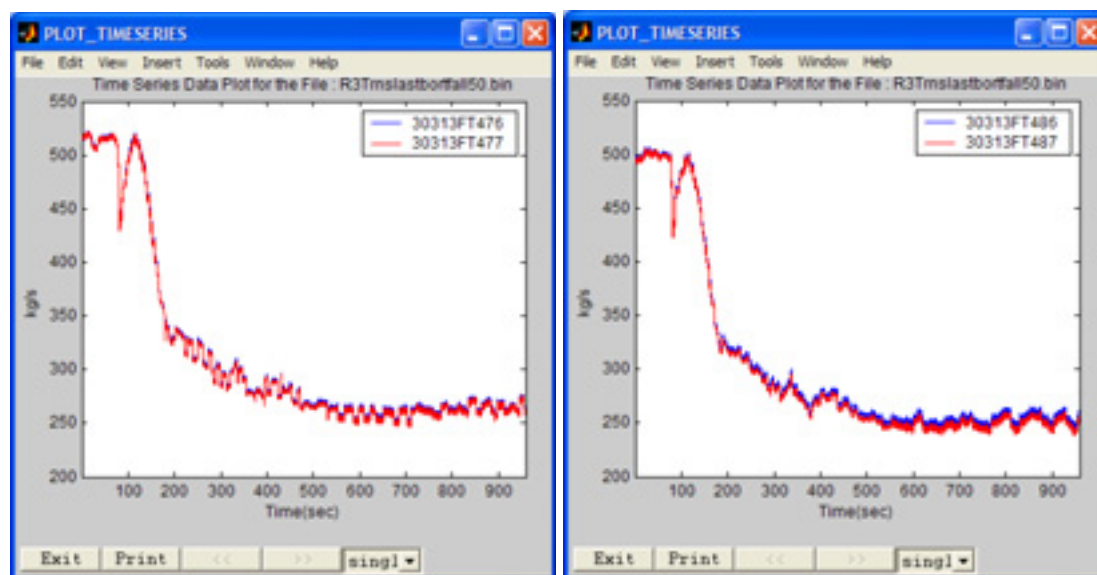
Matarvattenpumparna som har till uppgift att förse matarvattenventilerna med differenstrycket 8 bar varvtalsregleras i Ringhals 3. De individuella pumparnas varvtal framgår av Figur 3.10-v och Figur 3.10-h. Det är totalt 6 pumpar, tre för vardera kondensator. För turbin 31 som presenteras i Figur 3.10-v framgår det att två av tre pumpar är i drift i början av mätningen och efter 300 sekunder upphör ytterligare en pump att leverera matarvattenflöde. Flödesbehovet är så pass litet att det räcker med en pump. Motsvarande pumpvarvtal för turbin 32 visas i Figur 3.10-h. Här nyttjas två pumpar under hela transienten. Orsaken till det större pumpbehovet för turbin 32 är att dess kondensator har högre nivå som kondensornivåregulatorn arbetar med genom att ta högre matarvattenflöde från kondensorn som tillhör turbin 32.

Neutronflödet under transientprovet till 50 % presenteras i Figur 3.11-v. Strax innan lastbortfallet är effekten 92.5 % för att sedan sjunka till 50 %.

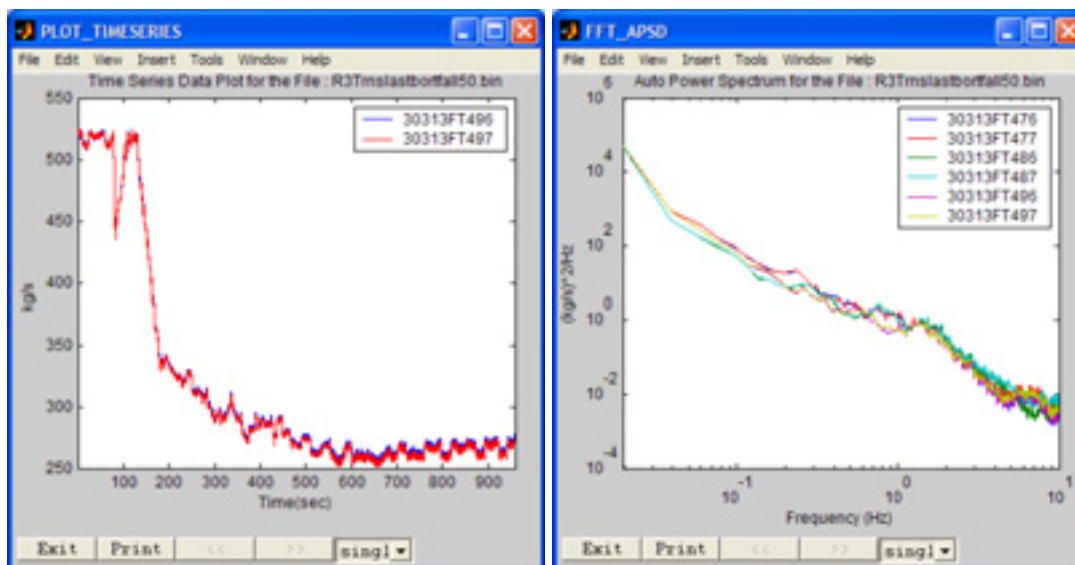
Kondensornivåerna 31413K418 för turbin 31 och 32413K418 för turbin 32 under lastbortfallet till 50 % visas i Figur 3.11-h. Kondensorn för turbin 31 har lägre nivå än kondensorn för turbin 32 efter 150 sekunder men kondensoregleringen återställer balansen mellan nivåerna över tiden så att nivåerna i stort sett överensstämmer i slutet av registreringen, se Figur 3.11-h.



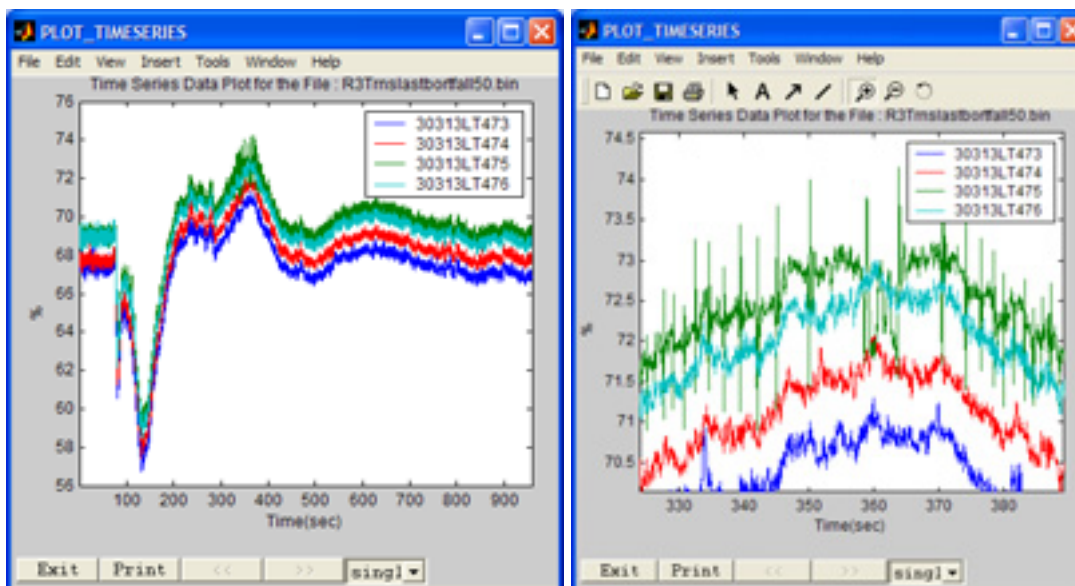
Figur 3.1 Ångflödessignaler som funktion av tiden (vänster diagram) samt motsvarande APSD (höger diagram) för Ånggenerator 1, 2 och 3 insamlade under experimentet med lastbortfall till 50 %.



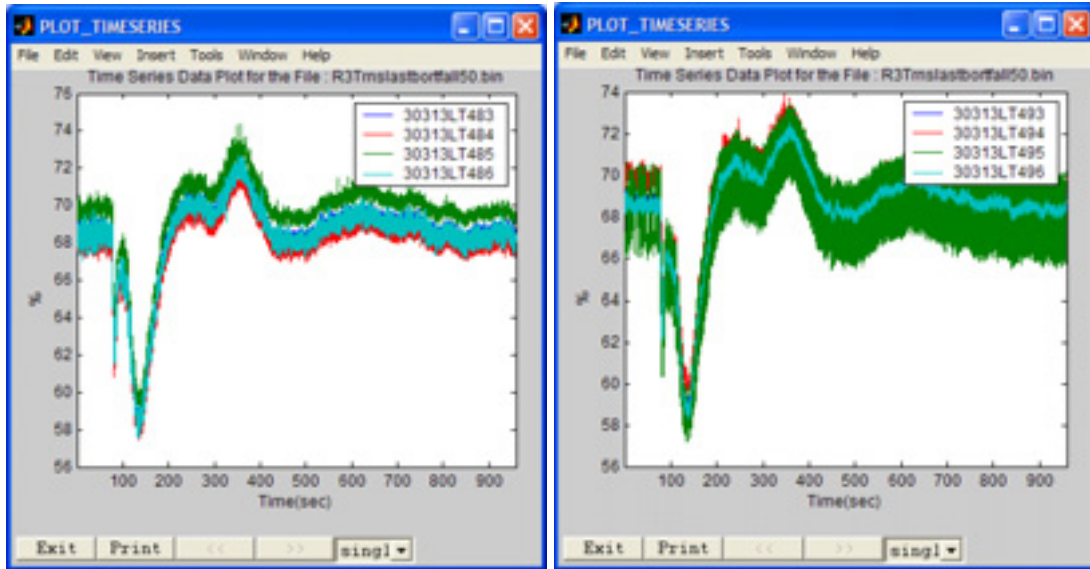
Figur 3.2 Matarvattenflöde till Ånggenerator 1 (vänster diagram) och Ånggenerator 2 (höger diagram) under provet med lastbortfall till 50 %.



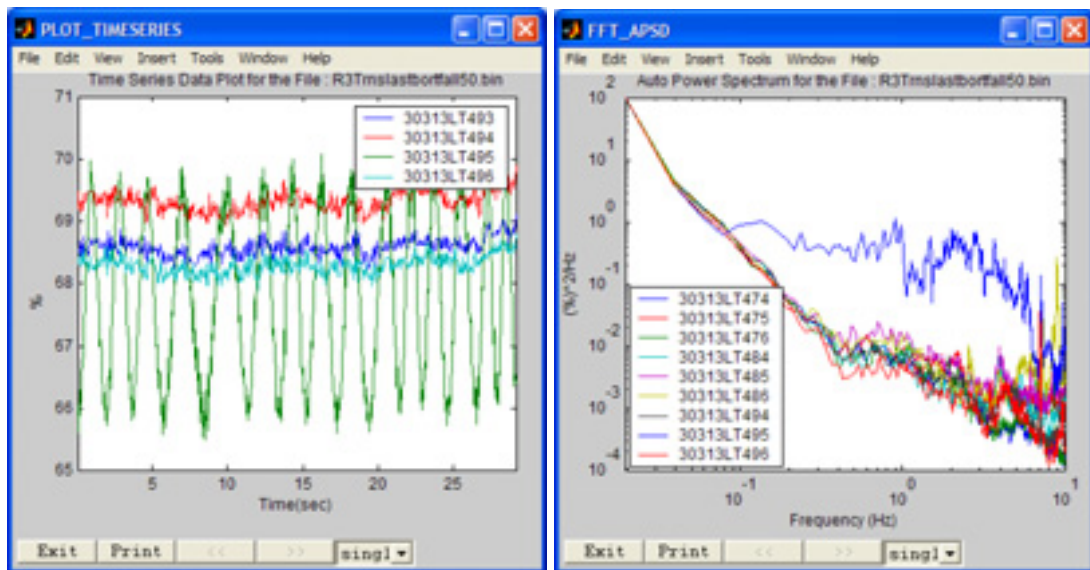
Figur 3.3 Matarvattenflöde till Ånggenerator 3 (vänster diagram) och APSD (höger diagram) för samtliga matarvattensignaler som anslutits till matarvattenregulatorerna under experimentet med lastbortfall till 50 %.



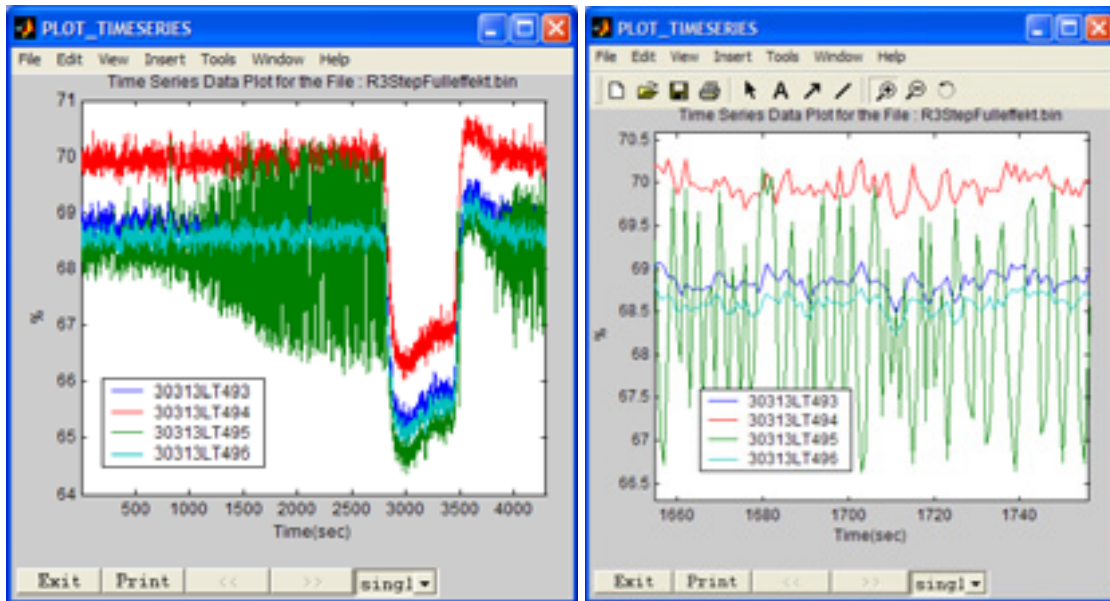
Figur 3.4 Nivåsignaler i Ånggenerator 1 under provet med lastbortfall till 50 % (vänster diagram) samt tidsexpanderad detalj av figuren (höger diagram). Observera de intermittenta spikarna hos signalen 30313LT-475.



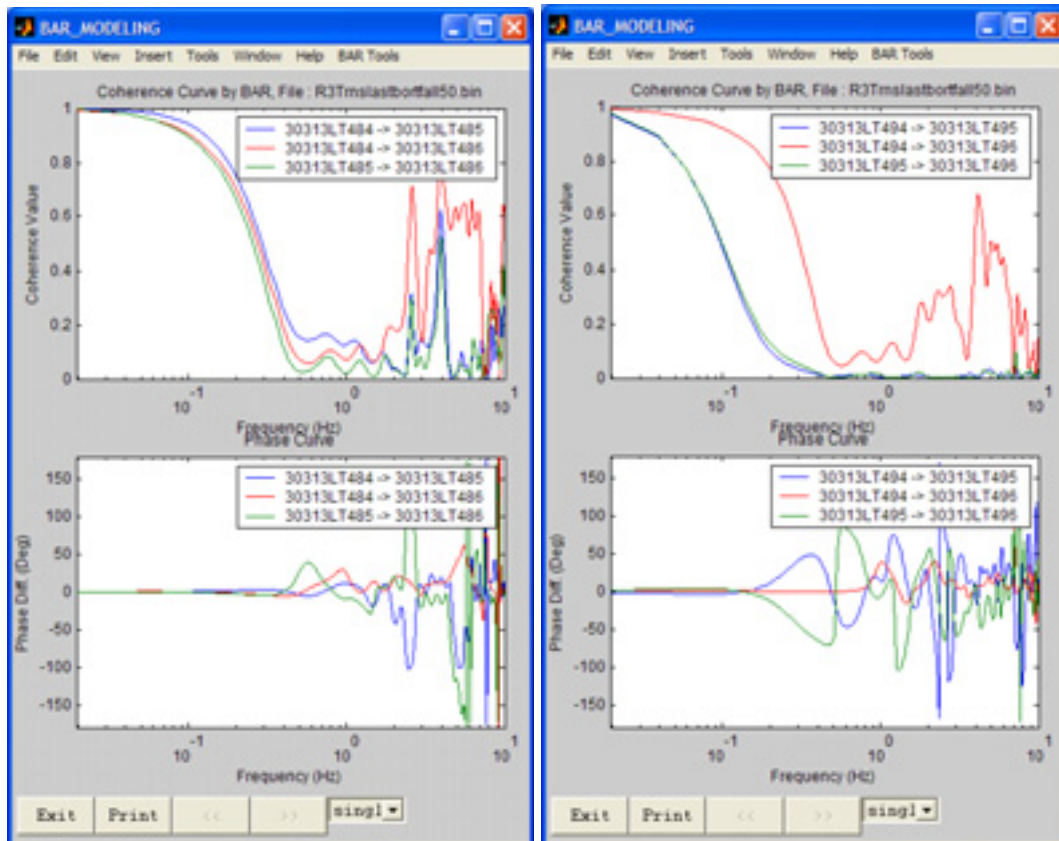
Figur 3.5 Nivåsignaler hos Ånggenerator 2 (vänster diagram) och Ånggenerator 3 (höger diagram) under provet med lastbortfall till 50 %. Observera den kraftigt förhöjda fluktuationen hos signalen 30313LT495.



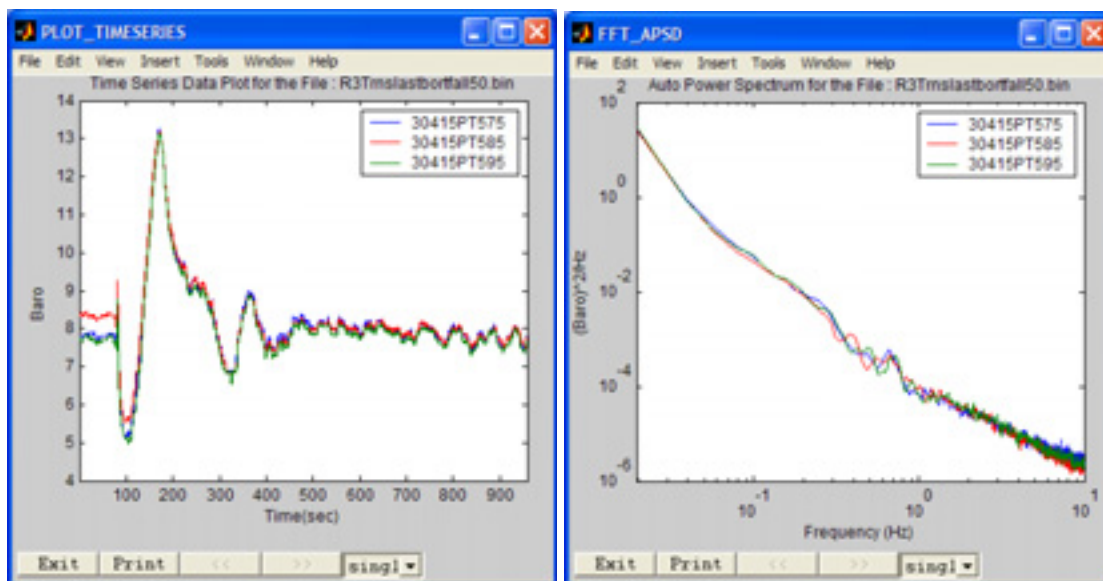
Figur 3.6 Nivåsignalerna hos Ånggenerator 3 i expanderad tid (vänster digram) samt APSD (höger diagram) för motsvarande nivåsignaler under experiment med lastbortfall till 50 %. Observera oscillationen med 4 % amplitud och varierande periodtid hos 30313LT-495 samt avvikelserna i APSD för denna signal från övriga spektra redan vid 0.08 Hz.



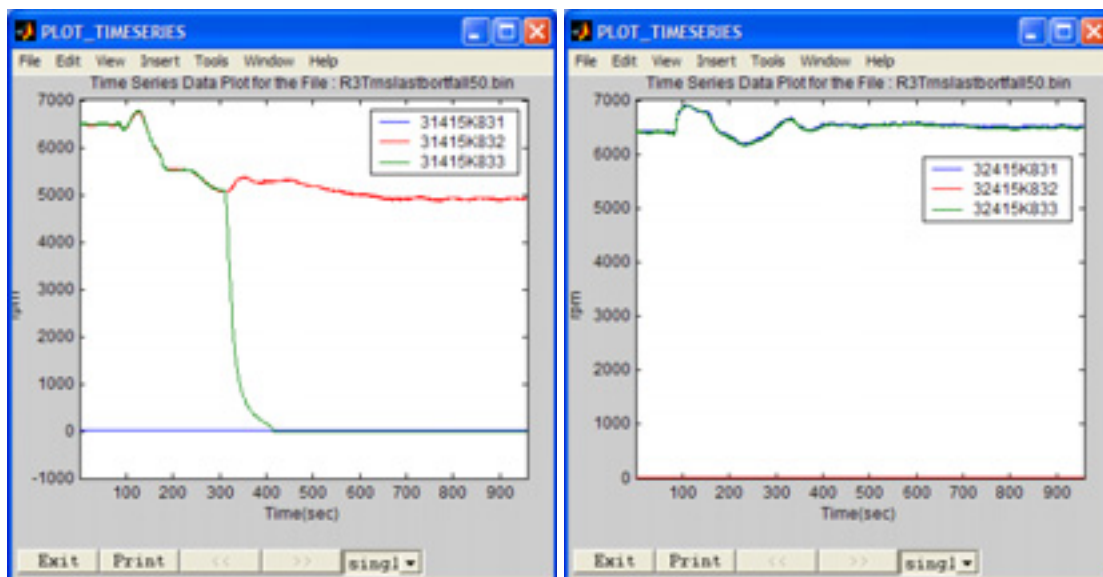
Figur 3.7 Nivåsignalerna hos Ånggenerator 3 under provet med börvärdesstegstörning av nivån vid full effekt. Observera att nivåsignalen 30313LT495 intermittent uppträder med hög oscillationsamplitud.



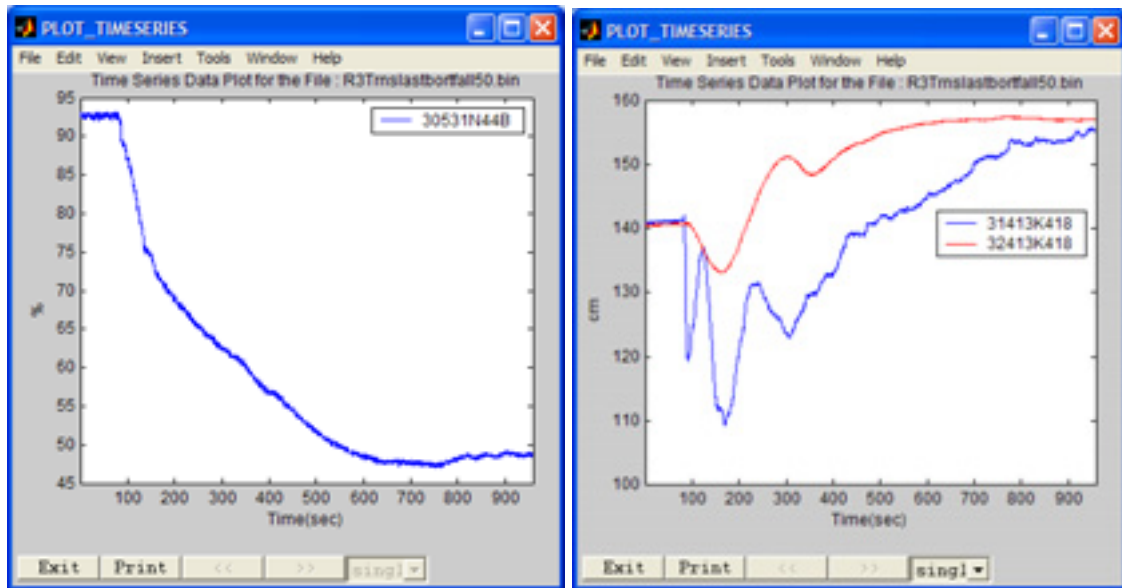
Figur 3.8 Koherensen mellan nivåsignalerna i Ånggenerator 2 (vänster diagram) och 3 (höger diagram) under lastbortfallet till 50 %. Observera att reducerad koherens gäller mellan signalkombinationer som innehåller 30313LT-495, se höger diagram.



Figur 3.9 Differenstryck över matarvattenventilerna till Ånggeneratorerna 1, 2 och 3 (vänster diagram) samt motsvarande APSD (höger diagram). Mätsignalerna insamlade under experimentet med lastbortfall till 50 %. Observera likheten mellan signalerna samt att trycket DP varierar mellan 5 och 13 bar under transienten. Regulatorns börvärde är 8 bar.



Figur 3.10 Varvtalen hos matarvattenpumparna för turbin 31 (vänster diagram) och turbin 32 (höger diagram) under lastbortfallet till 50 %. Observera att endast två pumpar är i drift för vardera turbin i början av provet samt att ytterligare en pump stoppas efter 300 sekunder, se vänster diagram.



Figur 3.11 Neutronflödet som funktion av tiden under provet med lastbortfall till 50 % (vänster diagram). Kondensornivån för turbin 31 och 32 under lastbortfallet till 50 % (höger diagram).

Tabell 1 Mätsignalernas signalnamn, funktion och enhet vid Ringhals 3

Signalnamn	Funktion	Enhet
30313FCV478	Styrsignal FCV478	%
30313FCV478POS	Ventilläge FCV478	%
30313FCV488	Styrsignal FCV488	%
30313FCV488POS	Ventilläge FCV488	%
30313FCV498	Styrsignal FCV498	%
30313FCV498POS	Ventilläge FCV498	%
30313FT-474	Ångflöde ÅG1	kg/s
30313FT-475	Ångflöde ÅG1	kg/s
30313FT-476	Mavaflöde ÅG1	kg/s
30313FT-477	Mavaflöde ÅG1	kg/s
30313FT-484	Ångflöde ÅG2	kg/s
30313FT-485	Ångflöde ÅG2	kg/s
30313FT-486	Mavaflöde ÅG2	kg/s
30313FT-487	Mavaflöde ÅG2	kg/s
30313FT-494	Ångflöde ÅG3	kg/s
30313FT-495	Ångflöde ÅG3	kg/s
30313FT-496	Mavaflöde ÅG3	kg/s
30313FT-497	Mavaflöde ÅG3	kg/s
30313LC478	Nivåregulator utsignal ÅG1	%
30313LC488	Nivåregulator utsignal ÅG2	%
30313LC498	Nivåregulator utsignal ÅG3	%
30313LT-473	Nivå ÅG1	%
30313LT-474	Nivå ÅG1	%
30313LT-475	Nivå ÅG1	%
30313LT-476	Nivå ÅG1	%
30313LT-483	Nivå ÅG2	%
30313LT-484	Nivå ÅG2	%
30313LT-485	Nivå ÅG2	%
30313LT-486	Nivå ÅG2	%
30313LT-493	Nivå ÅG3	%
30313LT-494	Nivå ÅG3	%
30313LT-495	Nivå ÅG3	%
30313LT-496	Nivå ÅG3	%
30313TE-411B	T hot ÅG1	Gr.C
30313TE-411C	T cold ÅG1	Gr.C
30313TE-421B	T hot ÅG2	Gr.C
30313TE-421C	T cold ÅG2	Gr.C
30313TE-431B	T hot ÅG3	Gr.C
30313TE-431C	T cold ÅG3	Gr.C
30415PT-575	Delta P ÅG1	Baro
30415PT-585	Delta P ÅG2	Baro
30415PT-595	Delta P ÅG3	Baro
30531N-44B	Neutronflöde	%
30537K801_56	Utsignal delta P-regulator	%
31413K418	Kondensornivå T31	cm
31415K831	Varvtal ärvärde mavapump 31-201	rpm
31415K832	Varvtal ärvärde mavapump 31-202	rpm
31415K833	Varvtal ärvärde mavapump 31-203	rpm
31537K806_55	Utsignal kondensorbalsensering	%
32413K418	Kondensornivå T32	cm
32415K831	Varvtal ärvärde mavapump 32-201	rpm
32415K832	Varvtal ärvärde mavapump 32-202	rpm
32415K833	Varvtal ärvärde mavapump 32-203	rpm
30313FR478	Mava-medel-loop 1	kg/s
30313FR488	Mava-medel-loop 2	kg/s
30313FR498	Mava-medel-loop 3	kg/s
30313LR478	SG-level-medel-loop 1	%
30313LR488	SG-level-medel-loop 2	%
30313LR498	SG-level-medel-loop 3	%

4 Egenskaper hos I&C-komponenter

I detta kapitel kommer resultat att redovisas som belyser egenskaperna hos de olika komponenterna som ingår i regulatorerna. Det är såväl de statiska som de dynamiska egenskaperna som avses. Analysen kommer att göras med processidentifiering. För att lyckas med analysen krävs insignal och utsignal från respektive enhet som undersöks. Mätsignalerna från transientprovet från fullast till 50 % effekt kommer att användas flitigt i detta fall eftersom signalamplituden är gynnsamt stor och samplingshastigheten så hög som 20 Hz. I de fall som analyser baserar sig på andra prov kommer detta särskilt att påpekas.

Den detaljerade instrumenteringen för matarvattenflödet till Ånggenerator 1 visas i Figur 2.2. För att få signalschemat för Ånggeneratorerna 2 respektive 3 behöver enbart den näst sista siffran (7) i signalnamnet bytas mot 8 respektive 9.

Som framgår av schemat i Figur 2.2 utgör tre redundanta neutronflödessignaler insignal till regulatorn. En mittvärdesväljare sorterar signalerna och väljarens utsignal är densamma som den mittersta signalen. Det betyder att om en av de tre neutronflödessignalerna upphör att fungera så har fortfarande mittvärdesväljaren korrekt utsignal. Efter mittvärdesväljaren följer ett lågpasfilter med överföringsfunktionen $G(s) = 1/(1 + T s)$.

En mittvärdesväljare med efterföljande lågpasfilter ingår också i instrumenteringen för nivåsignalerna som är anslutna till matarvattenregleringen, se schemat i Figur 2.2. Även denna så att säga utvalda signal kommer att fungera om en av de ingående tre transmittarna skulle upphöra att fungera. Den efterföljande filtreringen har överföringsfunktionen $G(s) = 1/(1 + T s)$ enligt schemat. Det gynnsamma i detta fall är att den filtrerade signalen har registrerats. Dess signalnamn är 30313LR478, se Figur 2.2. Processidentifiering av dynamiken för mittväljaren och lågpasfiltret har därför kunnat genomföras. Eftersom en mittvärdesväljare är en olinjär komponent så har en hygglig förenkling skett på sådant sätt att medelvärdet för de tre signalerna har beräknats som mittvärdesväljarens utsignal. Den benämns SG-lev1 = (0.333 LT474 + 0.333 LT475 + 0.333LT476). Signalen SG-lev1 tolkas nu som insignal och 30313LR478 tolkas som utsignal vid identifieringen. Resultatet av identifieringen för de tre ånggeneratorerna visas i Figur 4.1. De tre översta graferna visar de framräknade nivåsignalerna SG-lev1, SG-lev2 och SG-lev3 medan de tre nedre graferna visar en blå kurva som är mätsignalerna 30313LR478, 30313LR488 och 30313LR498. Förutom de blå nedre kurvorna finns det nästan likadana kurvor som är röda, se Figur 4.1. Dessa signaler är de estimerade utsignalerna från de identifierade modellerna. Det är mycket god överensstämmelse mellan uppmätt och estimerad utsignal. Detta betyder att modellen är en god beskrivning av verkligheten. Stegsvartest görs nu med de identifierade modellerna och resultaten visas i Figur 4.2. Figuren visar att förstärkningen är 1 för samtliga I&C-enheter samt att tidskonstanten TC är 5.8 sekunder för ÅG-1, 5.8 sekunder för ÅG-2 och 6.5 sekunder för ÅG-3.

Parameteruppgifterna från Ringhals för filtret $G(s)$ säger att förstärkningen är 1 och $TC=5$ sekunder. Detta innebär att det är god överensstämmelse mellan beräknat och uppgivet värde.

På samma sätt har en analys gjorts av de medelvärdesbildande enheter som används för matarvattenflödessignalerna. Matarvattenflödessignalen som används i regulatorn har instrumenterats som medelvärdet av två transmittersignaler, se Figur 2.2. De signaler

som är föremål för medelvärdesbildningen är 30313FT476 och 30313FT477. Den signal som blir resultatet i instrumentsystemet efter medelvärdesbildningen kallas 30313FR478. Det gynnsamma är att denna signal också registrerats som mätsignal. De dynamiska och statiska egenskaperna hos den medelvärdesbildande enheten har undersökts med hjälp av processidentifiering. Resultaten framgår av Figur 4.3 och 4.4. Identifieringen sker här genom att medelvärdesignalen beräknas teoretiskt till Mava-med1 = (0.5 FT476 + 0.5 FT477) för Ånggenerator 1. Motsvarande teoretiska medelvärdes signaler har beräknats för Mava-med2 och Mava-med3.

En matematisk modell har anpassats med Mava-med1 som insignal och 30313FR478 som utsignal och resultatet framgår av Figur 4.3. I denna figur presenteras resultaten för alla tre ånggeneratorerna. De tre översta diagrammen i figuren är de beräknade teoretiska insignalerna Mava-med1, Mava-med2 och Mava-med3. De undre graferna visar blå kurvor som är de elektroniska I&C-signalerna som registrerats i anläggningen. Överlagrat dessa syns de estimerade utsignalerna som erhållits från modellerna. Det är i det närmaste perfekt överensstämmelse mellan de estimerade signalerna och de uppmätta. Detta innebär att modellerna är goda beskrivningar av instrumentkomponenterna.

Stegsvarstest av modellerna visas slutligen i Figur 4.4. Denna figur visar att förstärkningen är 1 för samtliga komponenter samt $TC = 0.8$ sekunder för ÅG-1, $TC = 0.77$ sekunder för ÅG-2 och $TC = 0.85$ sekunder för ÅG-3. Resultaten är väl överensstämmande för de olika enheterna, se Figur 4.4. Några uppgifter om tidskonstanter för dessa komponenter har inte erhållits från Ringhals.

4.1 Identifiering av regulatorernas parametrar

De regulatorer som ingår i matarvattenregleringen och som har registrerade insignaler och utsignaler har analyserats med processidentifiering. Dessa villkor är uppfyllda för DP-regulatorn, Kondensorregulatorn samt nivåregulatorerna för de tre ånggeneratorerna. För flödesregulatorerna däremot har den verkliga insignalen inte kunnat konstrueras och därför uteblir resultaten för denna regulatortyp.

Ett flertal datafiler föreligger och därför har ett omfattande antal analyser genomförts för att beräkna regulatorernas parametrar utifrån de genomförda identifieringarna. De analyser som tas med i rapporten är de som givit den bästa överensstämmelsen mellan regulatorns utsignal och den estimerade utsignalen.

Resultaten framgår av Figur 4.5–4.9 samt av sammanställningen i Tabell 2. DP-regulatorn och Kondensorregulatorn gav bäst överensstämmelse mellan uppmätt och estimerad utsignal med mätdata från full last till 50 % effekt, medan nivåregulatorerna gav den bästa överensstämmelsen med mätdata från stegstörningen av DP-börvärdet.

Figuren 4.5-v presenterar estimerad och registrerad utsignal från DP-regulatorn. Stegttesten av den identifierade modellen som visas i höger graf uppger att $K_p = 0.78$ och $T_i = 41.5$ sekunder. Dessa ska jämföras med de teoretiska värdena 0.67 och 44.8 sekunder. Det är god överensstämmelse såväl mellan graferna som mellan estimerade och uppgivna parametrar, se också Tabell 2.

Resultat från identifieringen av kondensorregulatorn visas i Figur 4.6. Överensstämmelsen är i detta fall fortfarande god men något sämre än i det fall som

presenterades i Figur 4.5. Stegsvartesten visar att $K_p = 0.93$ och $T_i = 203.6$ sekunder. Dessa ska jämföras med de teoretiska värdena 0.93 respektive 200 sekunder. Siffervärdena som beräknats visar följaktligen en mycket god överensstämmelse med de teoretiska värdena, se Tabell 2.

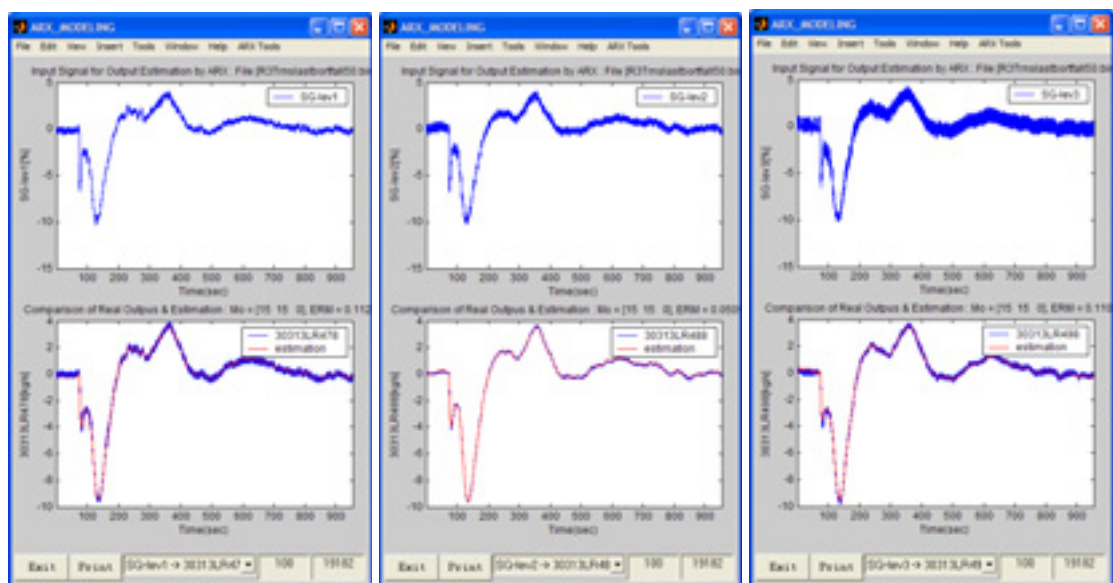
För nivåregulatorerna identifieras inte bara PI- utan också D-egenskaperna hos regulatorerna. För samtliga tre regulatorer råder en mycket god överensstämmelse mellan de estimerade och uppmätta utsignalerna från regulatorerna. Se de vänstra graferna i Figur 4.7–4.9. Sammantaget visar de beräknade parametrarna god överensstämmelse mellan beräknat $K_p = 0.92$ – 0.94 och det teoretiska värdet 0.90. Integrationstiderna för de tre nivåregulatorerna beräknas till $T_i = 199$ – 243 sekunder. Resultaten är i samma storleksordning som det teoretiska värdet $T_i = 200$ sekunder, även om två av resultaten har betydligt längre tidskonstanter än det teoretiska värdet, se Tabell 2.

Parametrarna för derivation kan också jämföras med de teoretiska motsvarigheterna. Detta görs i Tabell 2. Deriveringskonstanten $K_d = 3.5$ – 5.8 ska jämföras med det teoretiska värdet 9. Filterkonstanten för derivation som beräknas till $T_d = 3.9$ – 6.4 sekunder ska jämföras med det teoretiska värdet 5 sekunder. Deriveringskonstanten K_d är enligt tabellen den parameter som procentuellt avviker mest från de teoretiska värdena.

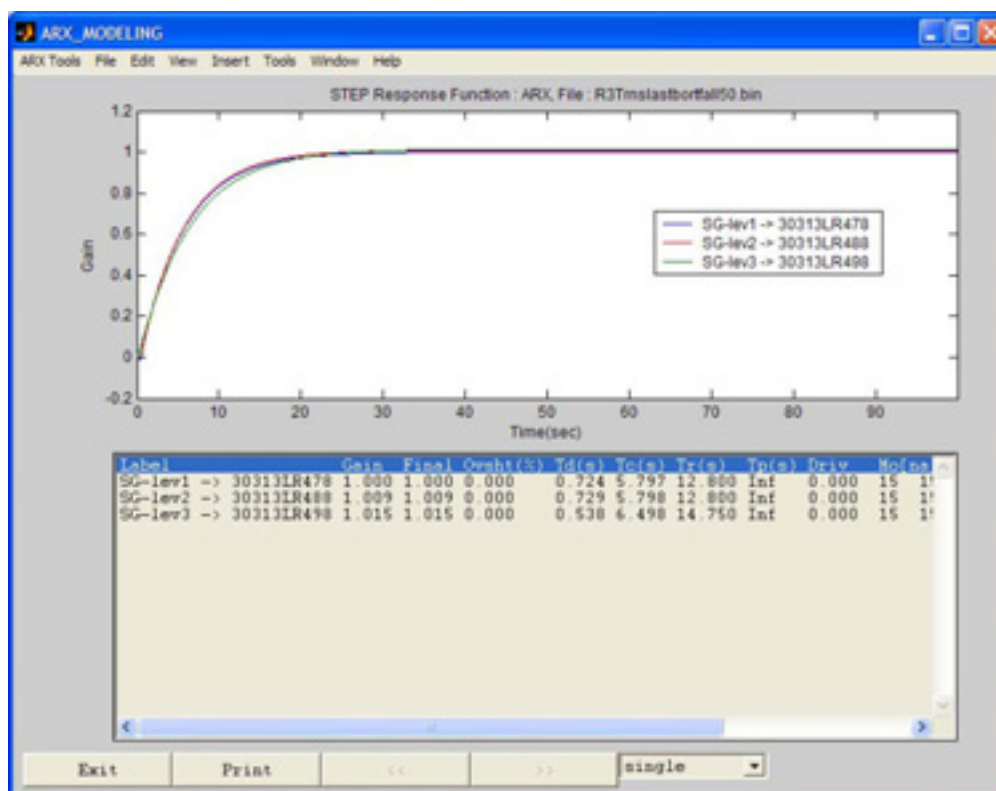
Sammanfattningsvis kan konstateras att identifieringarna uppvisar god överensstämmelse mellan de estimerade och uppmätta utsignalerna från regulatorerna. Detta ”bevisar” att de beräknade modellerna har rimliga egenskaper. De detaljerade jämförelserna mellan modellens parametrar och de teoretiska parametrarna visar på god överensstämmelse för regulatorns förstärkning och integration. För regulatorns derivation däremot erhålls något sämre resultat.

Tabell 2 Resultat från processidentifieringen av regulatorerna. Sifferuppgifterna från Ringhals har angivits inom parentes.

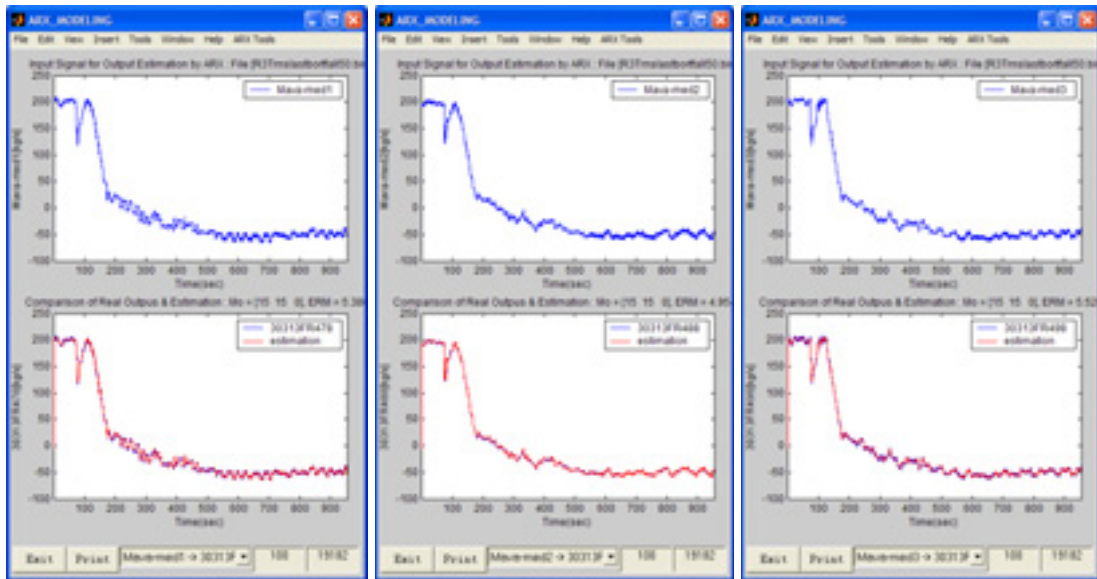
Regulator	K_p	T_i (s)	K_d	T_d (s)
DP	0.78 (0.67)	41.5 (44.8)	*	*
Kondensor	0.93 (0.93)	204 (200)	*	*
Nivå ÅG-1	0.94 (0.9)	231 (200)	3.5 (9)	4 (5)
Nivå ÅG-2	0.93 (0.9)	199 (200)	4.5 (9)	3.9 (5)
Nivå ÅG-3	0.92 (0.9)	243 (200)	5.8 (9)	6.4 (5)



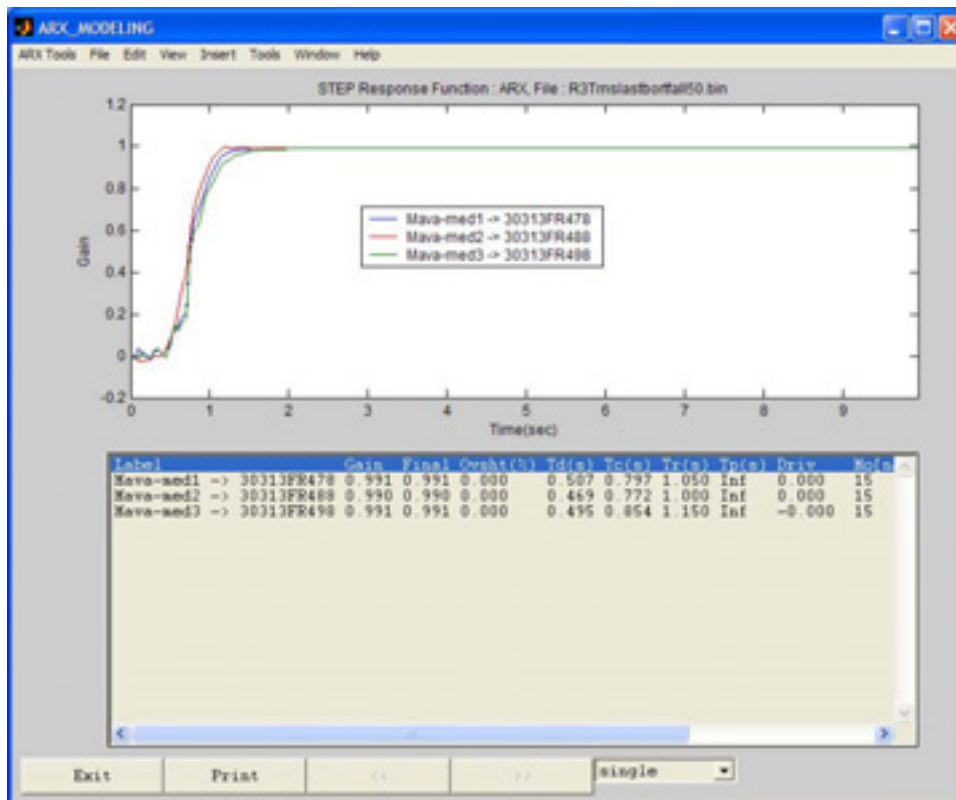
Figur 4.1 Identifiering av dynamiken och förstärkningen för de tre olika mittvärdesväljarna för nivåsignalerna. SG-lev1, SG-lev2, SG-lev3 är insignaler och 30313LR478, 30313LR488, 30313LR498 är respektive utsignaler. Det är mycket god överensstämmelse mellan de uppmätta utsignalerna och modellens utsignaler.



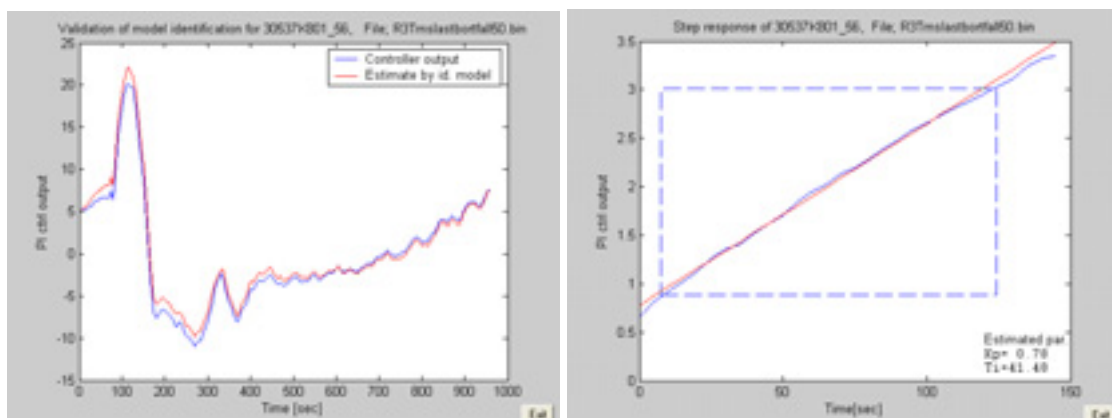
Figur4.2 Stegsvartstest med de identifierade modellerna av regulatorns I&C-enheter för medelvärdesbildning och filtrering av nivåsignalerna. Förstärkningarna är 1 för samtliga enheter och tidskonstanterna TC = 5.8–6.5 sekunder.



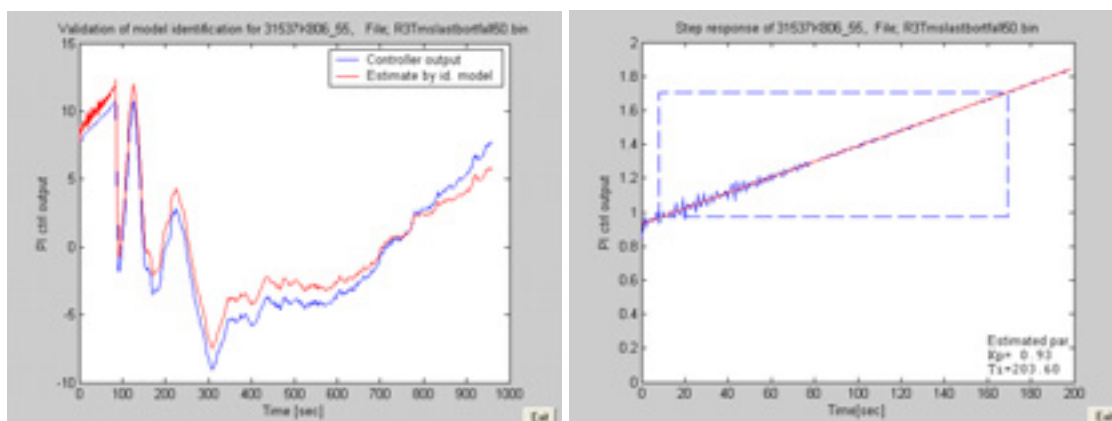
Figur 4.3 Identifiering av dynamiken och förstärkningen för de tre olika medelvärdesbildarna för matarvattenflödet. MAVA-med1, MAVA-med2, MAVA-med3 är insignaler och 30313FR478, 30313FR488, 30313FR498 respektive utsignaler. Det är mycket god överensstämmelse mellan de uppmätta utsignalerna och modellens utsignaler.



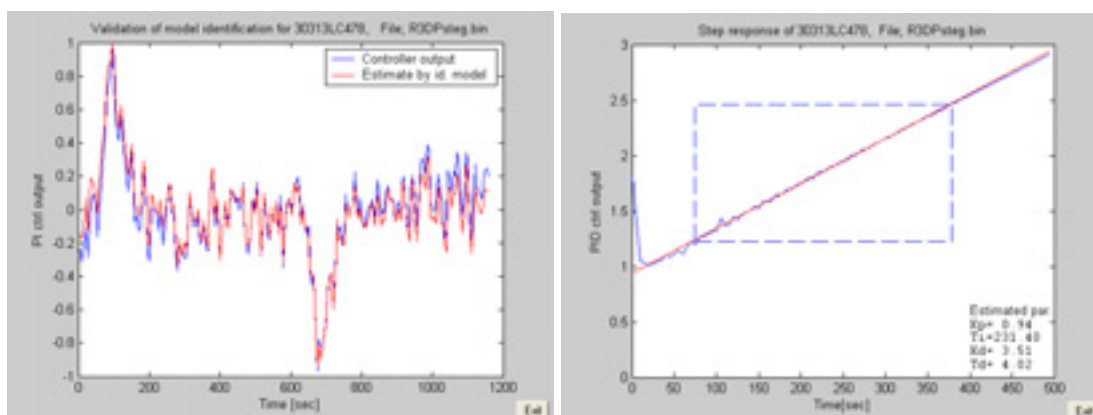
Figur 4.4 Stegsvartest med de identifierade modellerna av regulatorns I&C enheter för medelvärdesbildning av matarvattenflödessignalerna. Förstärkningarna är 1 för samtliga enheter och tidskonstanterna TC = 0.80–0.85 sekunder.



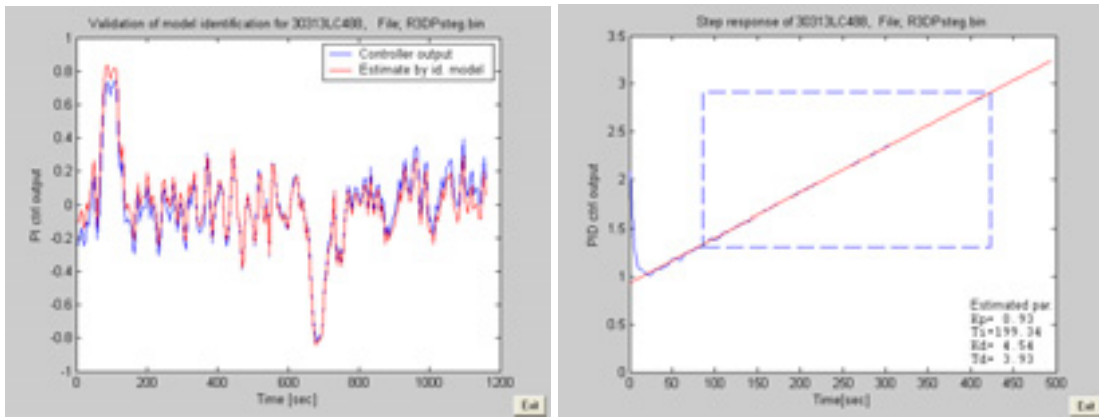
Figur 4.5 Processidentifiering av dynamiken för DP-regulatorn. Vänster graf visar utsignalen från regulatorn (blå kurva) samt den estimerade utsignalen (röd kurva). Höger graf visar stegsvarstest av modellen. Estimerade PI-parametrar $K_p = 0.78$ och $T_i = 41.5$ sekunder.



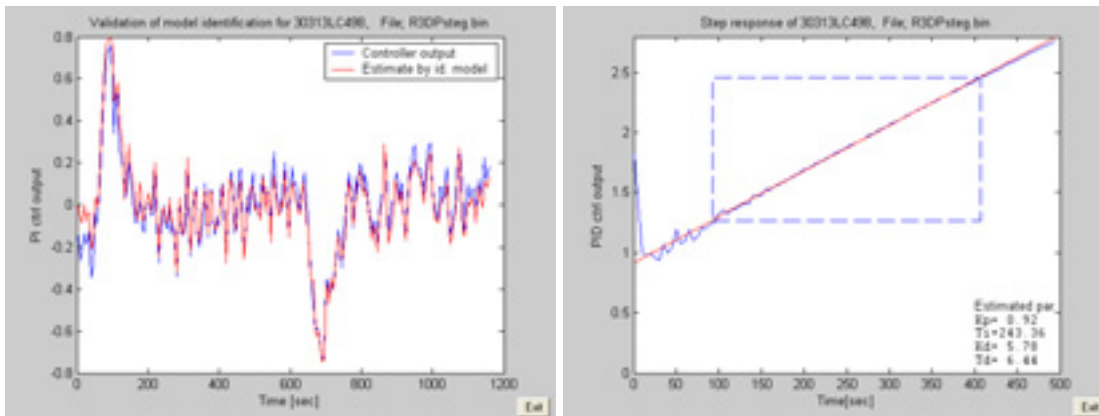
Figur 4.6 Processidentifiering av dynamiken för kondensornivåregleringen. Vänster graf visar utsignalen från regulatorn (blå kurva) samt den estimerade utsignalen (röd kurva). Höger graf visar stegsvarstest av modellen. Estimerade PI-parametrar $K_p = 0.93$ och $T_i = 203.6$ sekunder.



Figur 4.7 Processidentifiering av dynamiken för nivåregulatorn för ÅG-1. Vänster graf visar utsignalen från regulatorn (blå kurva) samt den estimerade utsignalen (röd kurva). Höger graf visar stegsvarstest av modellen samt beräkning av PID-parametrarna $K_p = 0.94$, $T_i = 231$ sekunder, $K_d = 3.5$ och $T_d = 4$ sekunder.



Figur 4.8 Processidentifiering av dynamiken för nivåregulatorn för ÅG-2. Vänster graf visar utsignalen från regulatorn (blå kurva) samt den estimerade utsignalen (röd kurva). Höger graf visar stegsvarstest av modellen samt beräkning av PID-parametrarna $K_p = 0.93$, $T_i = 199$ sekunder, $K_d = 4.5$ och $T_d = 3.9$ sekunder.



Figur 4.9 Processidentifiering av dynamiken för nivåregulatorn för ÅG-3. Vänster graf visar utsignalen från regulatorn (blå kurva) samt den estimerade utsignalen (röd kurva). Höger graf visar stegsvarstest av modellen samt beräkning av PID-parametrarna $K_p = 0.92$, $T_i = 243$ sekunder, $K_d = 5.8$ och $T_d = 6.4$ sekunder.

5 Karaktäristiken för matarvattenventilerna

Matarvattenventilernas funktion och egenskaper finns beskrivna i Referens 9. Speciellt den så kallade *Flow scan*-testen ger ett mycket gott intryck. Vi ser en ventil som inte uppvisar glapp, hysteres och som har god noggrannhet och repeterbarhet vid inställningen av ventilpositionen. Detta är mycket viktiga egenskaper för att lyckas med regleringen. En annan viktig egenskap är linjäriteten eftersom den har påverkan på reglersystemets stabilitet.

Figur 5.1–5.2 visar sambandet mellan matarvattenflödet och ventilpositionen för alla tre ventilerna. För ventilen FCV478 som tillhör ÅG-1 används 30313FCV478POS som x-koordinat och 30313FR478 som y-koordinat. För ÅG-2 används 30313FCV488POS som x-koordinat och 30313FT486 (av mättekniska skäl) som y-koordinat. För ÅG-3 slutligen nyttjas 30313FCV498POS som x-koordinat och 30313FR498 som y-koordinat. Det är stationära data från samtliga datafiler från Ringhals. Vid flödet = 250 kg/s syns data från två olika mätningar (blå och grön), se samtliga ventilkurvor i Figur 5.1–5.2. Dessa ligger nära varandra vilket är ett gott tecken. Likaså vid hög effekt omkring 500 kg/s är mätdata från två olika mätdatafiler representerade överlagrade varandra. Också detta visar att ventilinställningen är repeterbar under drift för samtliga ventilkurvor. Ventilkurvorna är med befintliga data fattiga på information, enbart lågt, medelhögt och högt flöde föreligger. För att få en bra bild skulle mätdata samlats in under hela effektuppgången för att kunna beskriva den kompletta kurvformen.

Stabiliteten för ett reglersystem och därmed dess dynamik beror på överföringsfunktionerna i det återkopplade systemet, se Figur 5.4 som visar ett enkelt exempel. Figuren visar ett återkopplat system som består av överföringsfunktionerna $G(s)$ och $H(s)$. En enkel Bodeanalys visas med grafen i samma figur. Den består av förstärkningskurvan samt faskurvan för GH. Det intressanta är nu överkorsning-frekvensen ω_c som inträffar vid förstärkningen 1. Vid samma frekvens ω_c kan fasvinkeln avläsas. Enligt Bodeanalysen är det återkopplade systemet stabilt när nämnda fasvinkel är större än -180 grader vid frekvensen ω_c . Bodeanalysen ger dessutom rådet att ha en viss marginal kvar till -180 grader. Denna marginal kallas fasmarginal. För ett praktiskt fungerande system bör fasmarginalen vara 30-60 grader.

Figur 5.4 visar också det som inträffar när förstärkningen höjs hos överföringsfunktionerna i det återkopplade systemet. Det enda som inträffar är att förstärkningskurvan lyfts i Bodediagrammet. Faskurvan förblir densamma. Som ett resultat av den ökade förstärkningen ökar också ω_c till det som benämns ω_c' i figuren. Eftersom faskurvan är avtagande så innebär ökningen i förstärkning att fasmarginalen kommer att minska. Detta innebär i sin tur en försämrad stabilitet.

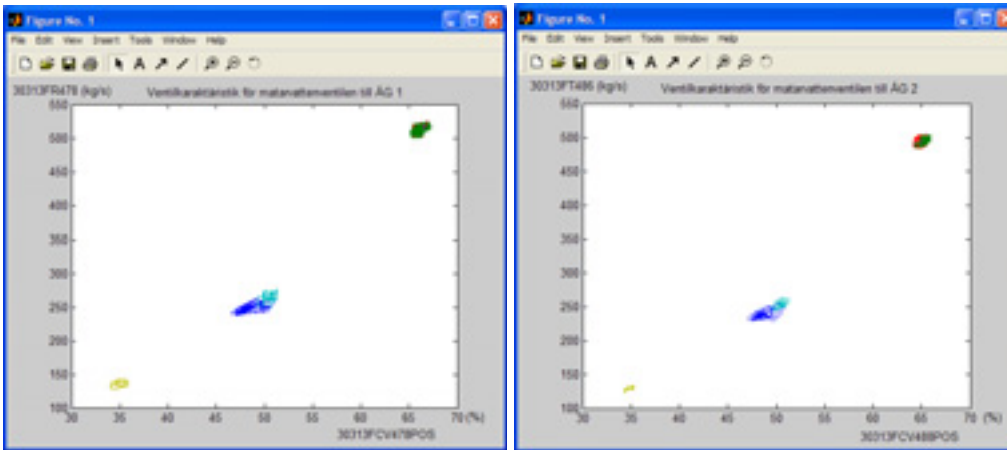
Ventilens förstärkning som reglerteknisk komponent definieras som derivatan $d(\text{flow})/d(\text{VP})$ där VP = ventilposition i den aktuella arbetspunkten. Det är denna förstärkning som ingår i Bodediagram-analysen. Trots att ventilkurvan som presenteras i Figur 5.2-v enbart innehåller tre punkter kan två derivator beräknas, vid lågt och högt flöde. Se de två interpolerande linjerna i Figur 5.2-v. Vid lågt flöde < 250 kg/s blir derivatan $d(\text{flow})/d(\text{VP}) = 8.8$ (kg/s/%) och vid högt flöde > 300 kg/s blir derivatan $d(\text{flow})/d(\text{VP}) = 16$ (kg/s/%). Ventilens förstärkning ökar med en faktor två enligt dessa beräkningar. Om nu stabilitetsmarginalen hade varit liten från början vid lågt flöde, så kunde förstärkningsökningen vid högt flöde innebära att regleringen blivit instabil.

För att råda bot på denna olägenhet har flödesregulatorn i Ringhals 3 - se Figur 2.2 - försetts med en så kallad *gain schedule* på utgången. Utsignalen från flödesregulatorns PI-del benämns okompenserad styrsignal X_o , se Figur 5.2-h. Denna signal utgör i sin tur insignal till den olinjära funktionen *gain schedule* vars utsignal är den kompenenserade styrsignalen X_p , se Figur 5.2-h. *Gain schedule* enheten justeras så att dess karaktär kompenenserar ventilens olinjäritet. I det ideala fallet blir således sambandet mellan X_o och matarvattenflödet helt linjärt och förstärkningen därmed konstant för effekter som är $> 20 \%$. På så sätt får reglersystemet konstant förstärkning och därmed oförändrad stabilitet oavsett driftläge.

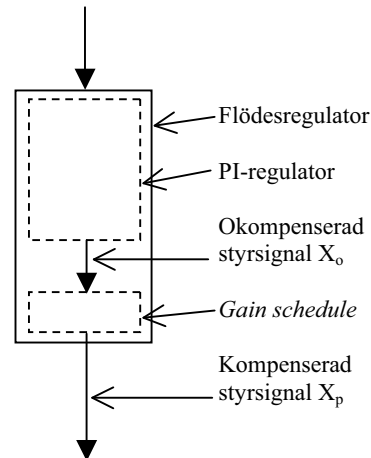
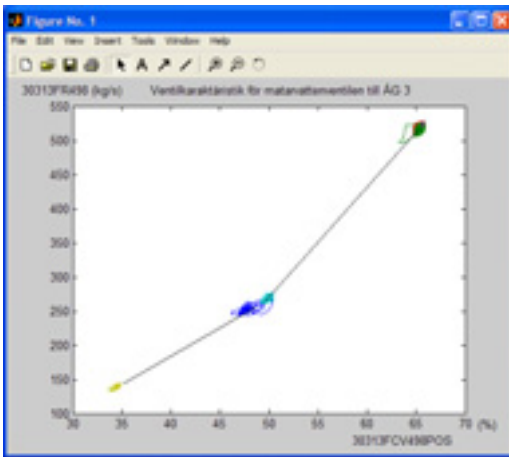
Att justeringen av *gain schedule* verkligen leder till linjäritet verifieras dock ej med mätdata från effektdrift i Ringhals 3. Detta är ett förbättringsbehov. En missanpassning mellan ventilkarakteristiken och *gain schedule* kan upptäckas genom att under effektdrift plotta samhörande data X_o och matarvattenflöde. En missanpassning kan leda till förhöjd derivata $d(\text{flow})/d(\text{VP})$ och därmed försämrade stabilitet i motsvarande driftpunkt.

Figur 5.3 visar ett teoretiskt exempel med tre grafer: ventilkurvan till vänster, *gain schedule* i mitten och den resulterande kompenationen till höger. En missanpassning mellan *gain schedule* och ventilkurvan leder i detta exempel till en lokalt mycket hög derivata $d(\text{flow})/d(\text{VP})$, markerad med röd färg i Figur 5.3. Orsaken till att grafen X_o och matarvattenflöde inte tagits fram uppges bero på att signalen X_o ej är mätbar i Ringhals 3.

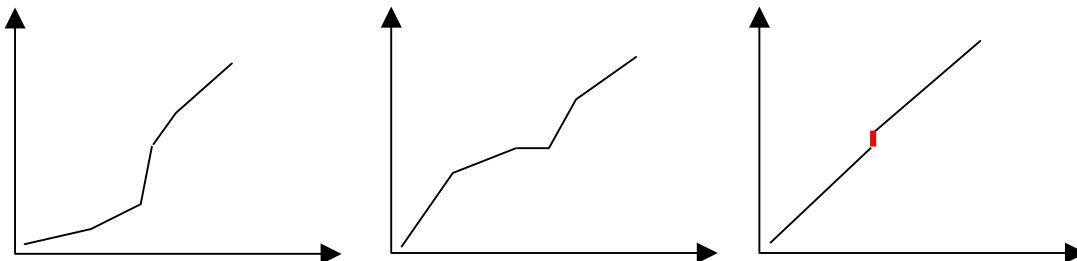
Under Kapitel 7 beskrivs resultat från stegstörning av matarvattenregleringen i Ringhals 3 vid såväl lågt som högt flöde. Dessa visar att reglersystemet i Ringhals 3 är stabilt med god stabilitetsmarginal som verifierar att ventilens varierande förstärkning $d(\text{flow})/d(\text{VP})$ kompenenserats av *gain schedule* enheten på ett bra sätt i dessa driftlägen.



Figur 5.1 Karaktärstiken för matarvattenventilerna för ÅG-1 (vänster diagram) och ÅG-2 (höger diagram). Graferna baseras på statistiska värden från fem olika mätningar med DP = 8 bar.

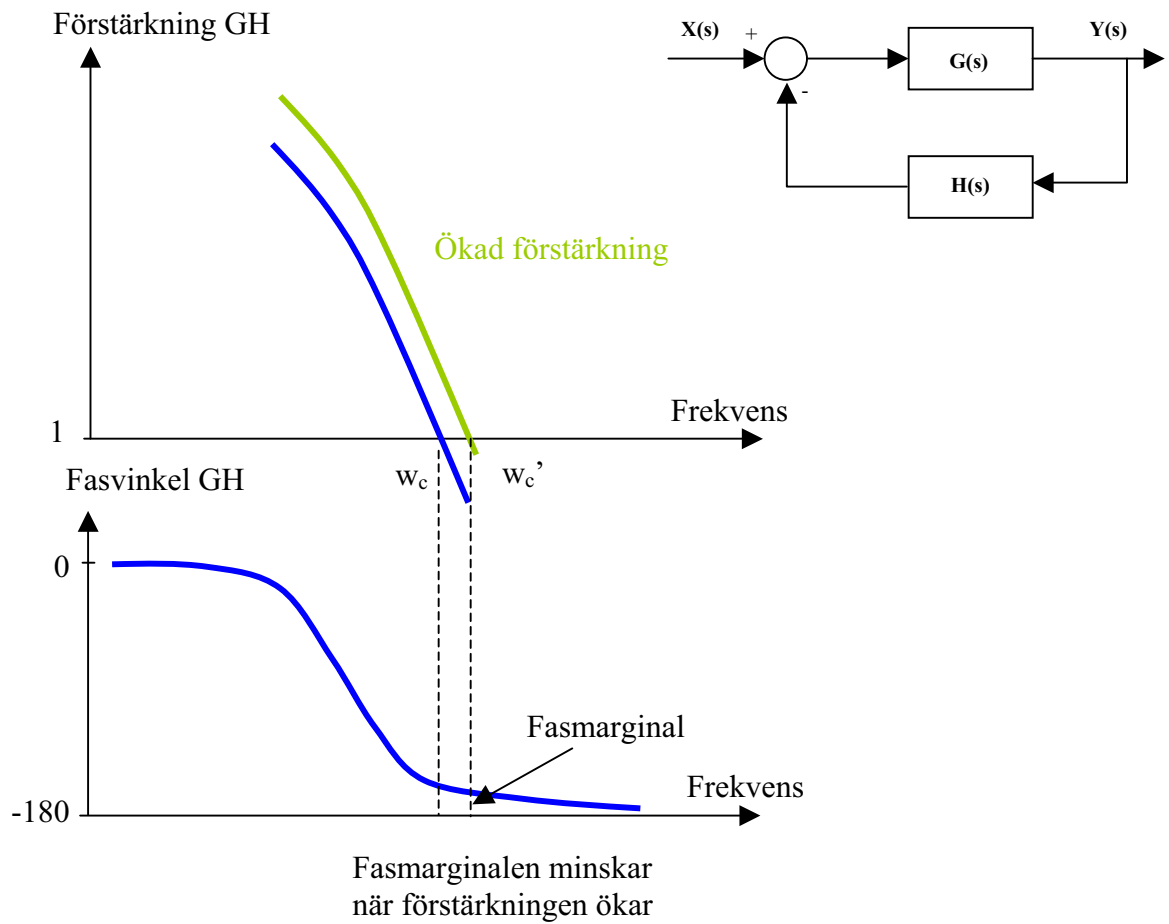


Figur 5.2 Karaktärstiken för matarvattenventilerna för ÅG-3 - grafen i vänster figur baseras på statistiska värden från fem olika mätningar med DP = 8 bar. De interpolerande linjerna i vänster figur visar att förstärkningen $d(\text{flow})/d(\text{valve pos})$ är beroende av ventilpositionen. Blockschemat till höger visar flödesregulatorns uppbyggnad med gain schedule för kompensering av ventilens olinjära funktion.



Figur 5.3 Ventilkurva, gain schedule och kompenserat resultat för X_o , matarvattenflöde.

Bode Diagram



Figur 5.4 Stabilitetsanalys vid förstärkningsändring hos ett återkopplat system med hjälp av Bodediagram.

6 Undersökning av matarvattenventilens positionsreglering

Av Figur 2.2 framgår det att matarvattenregleringen består av tre regulatorer. Den yttersta är nivåregulatorn med nivåbörvärdet och nivåärvärdet som insignaler och flödesbörvärdet som utsignal.

Sedan förekommer en inre regulator med flödesbörvärdet som insignal. I detta fall sker en framkoppling så att skillnaden mellan ångflödet och matarvattenflödet korrigerar flödesbörvärdet.

Den innersta av regulatorerna är slutligen matarvattenventilens ”positionsreglering”. Detta är ett reglersystem för läges- eller positionsreglering. En återkoppling sker av ventilens positionssignal som jämförs med ventilens börvärdessignal, se Figur 2.2. Läges- eller positionsåterkopplingen av ventilen är till för att bekämpa störningar som till exempel skulle kunna orsakas av påverkan på ventilpositionen från matarvattenflödet. Regleringen sker av allt att döma med en P-regulator.

Börvärdessignalen 30313FCV478 jämförs med ventilens positionssignal 30313FCVPOS. Skillnaden mellan dessa signaler kallas felsignal. Felsignalen påverkar i sin tur P-regulatorn som styr ut ventilen. Om förstärkningen är mycket hög är det lätt att inse att felsignalen kommer att bli liten. En låg förstärkning ger i sin tur bestående statisk avvikelse mellan börvärdet och ärvärdet.

Ventilen betraktas som ett enhetsåterkopplat system med 30313FCV478 som insignal och 30313FCVPOS som utsignal. Dessa signaler visas i Figur 6.1. Signalerna har reducerats från sina medelvärden. Den graf som är längst till vänster gäller för Ånggenerator 1. De övriga figurerna gäller för Ånggenerator 2 och 3. Det är i princip god överensstämmelse mellan den blå och den röda signalen i respektive graf. Det framgår dock att den röda signalen inte når den blå vid det maximala ventilutslaget (25 %) och störst är denna avvikelse för Ånggenerator 3, se Figur 6.1.

Processidentifiering av ventilernas lägesreglering presenteras i Figur 6.2. Det är det återkopplade systemets dynamik som undersöks. Börvärdet 30313FCV478 tolkas som insignal och ärvärdet 30313FCV478POS som utsignal. Insignalen och utsignalen tillsammans med den estimerade utsignalen visas i samma diagram. Det är god överensstämmelse mellan utsignalerna och de estimerade utsignalerna.

Stegsvarstest av de identifierade modellerna visas slutligen i Figur 6.3. Förstärkningen är 0.94 för ÅG-1, 0.97 för ÅG-2 och slutligen 0.87 för ÅG-3. Samma figur visar att dynamiken evaluerad som en enkel tidskonstant har följande resultat: $TC = 2$ sekunder för ÅG-1, $TC = 2.5$ sekunder för ÅG-2 och $TC = 2.6$ sekunder för ÅG-3.

Med ledning av de uppgifter som framkommer av stegsvaren kan positionsreglersystemets förstärkning beräknas:

Statiska felet mellan börvärdet och ärvärdet för ÅG-1, $e_1 = 1 - 0.94 = 0.06$

Statiska felet mellan börvärdet och ärvärdet för ÅG-2, $e_2 = 1 - 0.97 = 0.03$

Statiska felet mellan börvärdet och ärvärdet för ÅG-3, $e_3 = 1 - 0.87 = 0.13$

Förstärkningen för det öppna reglersystemet, F_1 för ÅG-1 beräknas:

0.06 *F1 = 0.94, F1= 15.7 ggr.

Förstärkningen för det öppna reglersystemet, F2 för ÅG-2 beräknas:

0.03 *F2 = 0.97, F2= 32.3 ggr.

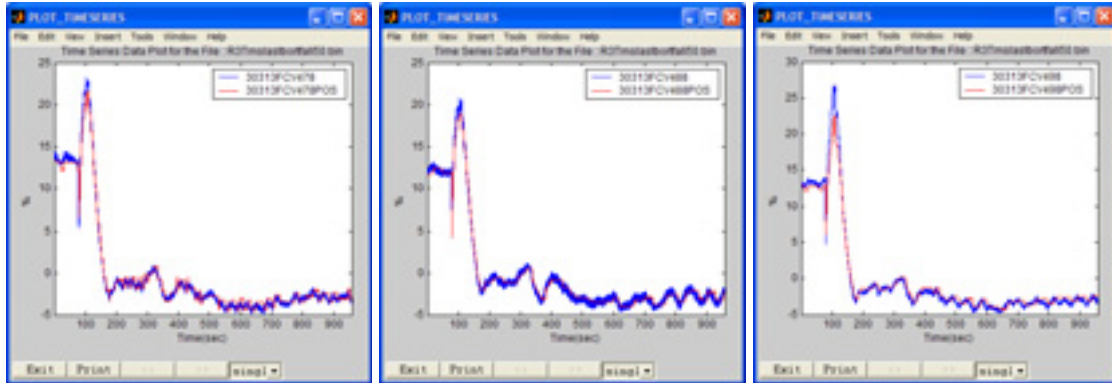
Förstärkningen för det öppna reglersystemet, F3 för ÅG-3 beräknas:

0.13 *F3 = 0.87, F3= 6.7 ggr.

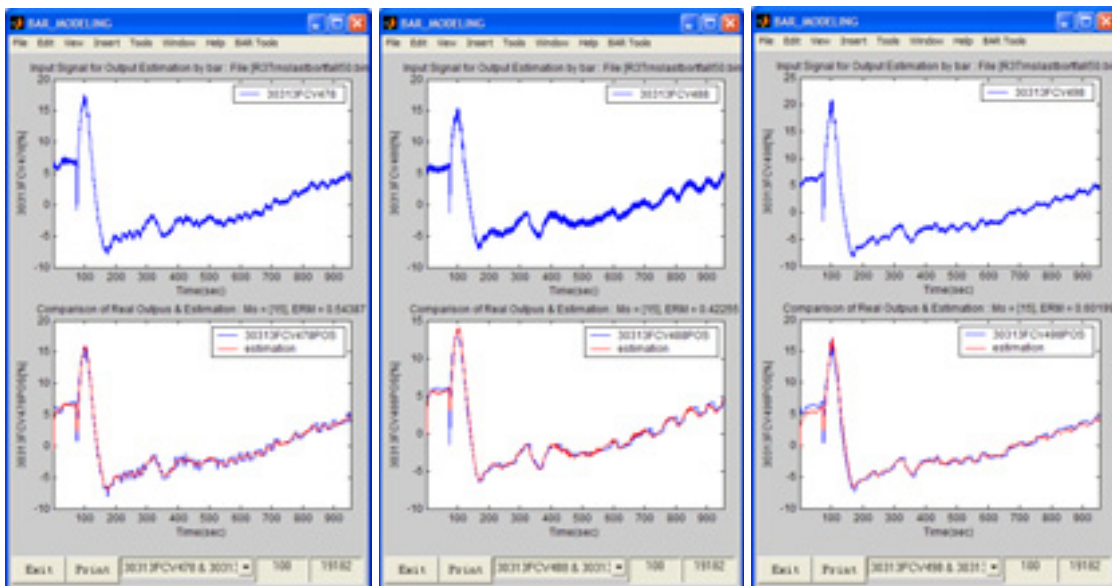
Beräkningarna visar att positionsregleringen hos matarvattenventilen för ÅG-3 har betydligt lägre förstärkning och därmed större positionsfel än de övriga ventilerna. De registrerade signalerna talar också samma språk. Ventilpositionen för ÅG-3 visar en större avvikelse till börvärdessignalen i jämförelse med de andra regulatorerna, se Figur 6.4. Allra bäst överensstämmelse har positionsregleringen för ÅG-2 som har den högsta förstärkningen $F2 = 32.3$.

Man kan tycka att denna avvikelse också borde påverka den statiska nivån i ånggeneratorn. Så är det dock inte. Samtliga ånggeneratorer når sina nivåer 69 %. Förklaringen är den att nivåregulatorns integrerande egenskap kompenserar för den avvikelse som ventillägesregleringen har i det stationära fallet. Avvikelsen bör dock betraktas som en tidig varning för underhåll, eftersom en reducering i förstärkningen kan inverka på reglersystemets dynamik.

Enligt uppgift från Ringhals erhålles ventilpositionssignalerna (FCV478POS, FCV488POS, FCV498POS) från tillfälligt monterade externa givare, ty de signaler som ingår i ventilens interna positionsreglering har inte varit tillgängliga för registrering. Om nu överensstämmelsen mellan den interna ventilpositionssignalen och den registrerade FCV498POS är sämre än för de övriga ventilerna så skulle detta kunna förklara den förhöjda statiska positionsavvikelsen som observeras för ventilen till ÅG-3.



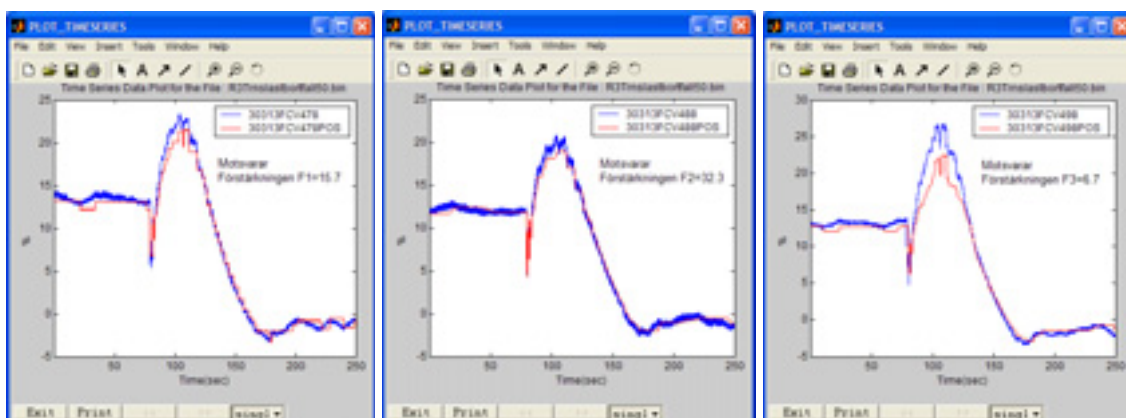
Figur 6.1 Signalerna till matarvattenventilerna samt motsvarande positioner-signaler för Ånggeneratorerna 1, 2 och 3.



Figur 6.2 Identifiering av dynamiken och förstärkningen för de tre olika positionersystemen för matarvattenventilerna. 30313FCV478, -FCV488, -FCV498 är insignaler och 30313FCV478POS, -FCV488POS, -FCV498POS är respektive utsignal. Det är mycket god överensstämmelse mellan de uppmätta utsignalerna och modellens utsignaler.



Figur6.3 Stegsvartest med de identifierade modellerna av regulatorns matarvattenventiler. Förstärkningarna är 0.94 för ÅG-1, 0.97 för ÅG-2 och 0.87 ÅG-3. Tidskonstanterna är 2.0 s för ÅG-1, 2.5 s för ÅG-2 och 2.6 s för ÅG-3.



Figur6.4 Styrsignalerna till matarvattenventilerna samt motsvarande ventilpositionssignaler. Observera att positionssignalen 30313FCV498POS inte når samma höjd som styrsignalen 30313FCV498.

7 Stegsvartstest av nivåregleringen vid låg och hög effekt

Två prov kommer att presenteras i detta kapitel som beskriver stegsvartstester vid låg och hög effekt. Stegtesterna gäller för nivåregulatorn och nivåbörvädet som normalt ligger vid 69 %. Börvärdet ökas stegformat med 3 % vid provet med låg effekt. Vid experimentet med hög effekt sker en stegformad minskning av börvärdet med 3 % från den ursprungliga nivån 69 %. Så snart stegändringen har svängt in sig på den nya nivån sker en stegformad återgång till den ursprungliga nivån.

Nivåsignalerna visas som funktion av tiden i Figur 7.1. Det vänstra diagrammet visar experimentet vid hög effekt när börvärdet reduceras med 3 %. Den blå kurvan gäller för ÅG-1 medan den röda avser vattennivån i ÅG-3. Testen av reglersystemet för ÅG-2 fanns inte med i dessa mätdata.

Regleringen uppvisar stabila egenskaper. Enbart en liten översväng (0.5-0.7 %) förekommer hos nivåsignalen. De statistiska egenskaperna är också goda. Steghöjden med 3 % infinner sig hos nivåsignalen. Det sistnämnda borgar nivåregulatorns integrerande egenskap för.

Provet med stegsvartstest vid låg effekt visas i det högra diagrammet i Figur 7.1. Alla tre nivåregulatorer testas i detta prov. Dynamiken är också i detta fall mycket god. Översvängningen vid regleringen är i detta fall ungefär som vid full effekt.

De insamlade nivåsignalerna analyseras och två tidskonstanter beräknas för varje experiment. Dessa benämns TC_{upp} som gäller vid nivåökning och TC_{ner} som gäller vid nivåreduktion. Resultaten finns sammanställda i Tabell 3. Tidskonstanterna varierar mellan 50.1 och 70.2 sekunder. Tidskonstanten för nivåregleringen är alltså ungefär 1 minut.

Sammanfattningsvis kan sägas att nivåregleringen vid såväl låg som hög effekt fungerar bra. Det finns inte några tecken på instabilitet och de statistiska egenskaperna är goda. Samtliga regulatorer har dessutom i stort sett överensstämmande dynamik som också bekräftas av de tidskonstanter som redovisas.

Intressant är också att notera att den förväntade undersvängen i samband med nivåstegändringen uteblir. Undersvängen förväntas på grund av icke minimumfasdynamik hos nivån i ånggeneratorn. Den uteblivna undersvängen gäller både vid hög och låg effekt och oavsett om nivån ökar eller minskar. Att icke minimumfasdynamiken inte uppträder bedöms bero på att även den låga effekten vid mätningarna i Ringhals 3 är högre än 20 %. I Referens 1 presenteras beräkningar som visar att undersvängen på grund av icke minimumfasdynamik är starkt effektberoende och minskar med ökande effekt.

Tabell 3 *Responsen hos nivåregleringen vid 3 % stegstörning hos börvärdet.*

	ÅG1	ÅG1	ÅG2	ÅG2	ÅG3	ÅG3
Tidskonstant	TC _{upp}	TC _{ner}	TC _{upp}	TC _{ner}	TC _{upp}	TC _{ner}
Låg effekt	50.2 s	56.4 s	70.2 s	50.1 s	63.4 s	67.3 s
Hög effekt	62.7 s	56.2	*	*	57.2 s	53.9 s

7.1 Nivåregulatorns PID-parameterar

Det återkopplade system som utgör den överordnade nivåregleringen i Ringhals 3 har en ungefärlig responstid av 60 sekunder. Responstiden i sin tur står i relation till överkorsningsfrekvensen w_c , se Figur 5.4. En ökning i w_c leder till ett snabbare reglersystem med kortare responstid. En reglerteknisk tumregel som anger sambandet mellan stigtiden T_r och w_c lyder:

$$T_r = 1.4 / w_c$$

där T_r är stigtiden i sekunder från 10 % till 90 % av stegsvarets slutvärde

Om den beräknade responstiden 60 sekunder för nivåregleringen approximativt tas för stigtiden T_r erhålls motsvarande $w_c = 0.023$ rad/s. Det intressanta nu är att studera vilket bidrag PID-regulatorn ger vid denna frekvens. För att göra det så beräknas PID-regulatorns överföringsfunktion och som jämförelse också motsvarande för PI-regulatorn.

Nivåregulatorns parameterinställning presenterades i Kapitel 2. Där framgick också regulatorns överföringsfunktion:

$$PID(s) = 0.9 + 1/(200 s) + 9 s/(1 + 5 s)$$

Bodediagrammet för PID-regulatorns överföringsfunktionen återges i Figur 7.3. I samma figur återges också PI-regulatorns överföringsfunktion som erhålls om derivatadelen exkluderas:

$$PI(s) = 0.9 + 1/(200 s)$$

Bodediagrammet presenterar PID-regulatorn med blå kurvor och PI-regulatorn med gröna kurvor. Av Figur 7.3 framgår det att PID-regulatorns faskurva har ett positivt fasbidrag mellan 0.01 och 10 rad/s i jämförelse med PI-regulatorns faskurva. Det är den deriverande funktionen hos PID-regulatorn som bidrar med detta.

Överkorsningsfrekvensen $w_c = 0.023$ rad/s återfinns som en liten pil som anger skillnaden i fasvinkel mellan PID- och PI-regulatorn. Den är positiv och cirka 12 grader, se Figur 7.3.

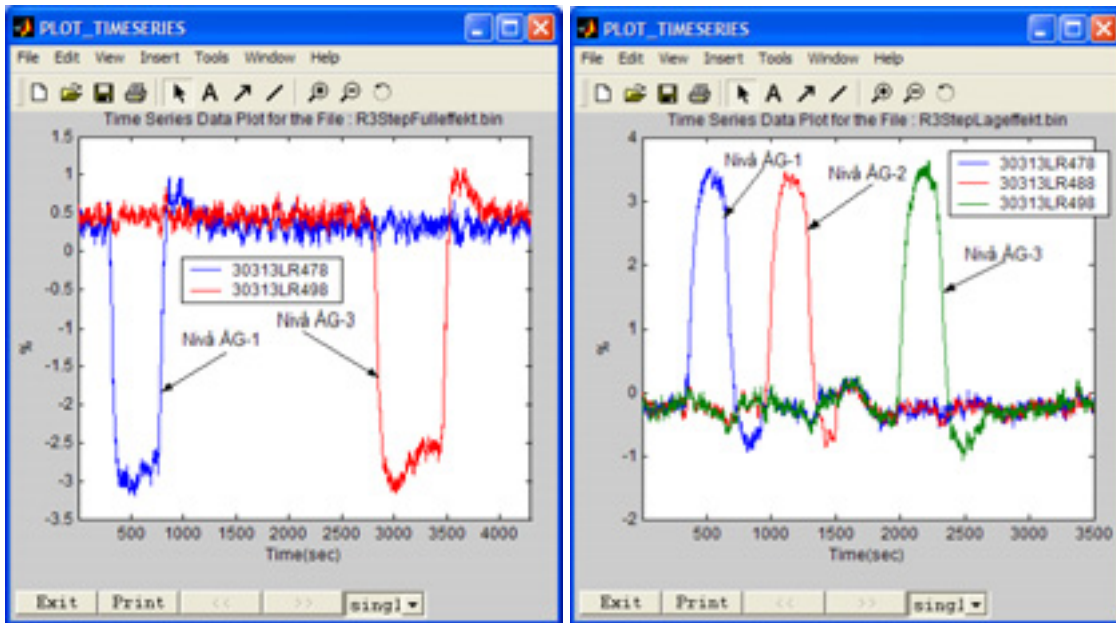
Reglertekniskt kan konstateras att nivåreglersystemen är stabila. Stegsvarstesterna visar att enbart en liten översväng förekommer, och några oscillationer med fast frekvens

förekommer inte hos nivåsignalerna med $\omega_c = 0.023$ rad/s. Detta innebär i sin tur att fasmarginalerna är mycket goda, förmodligen större än 60 grader.

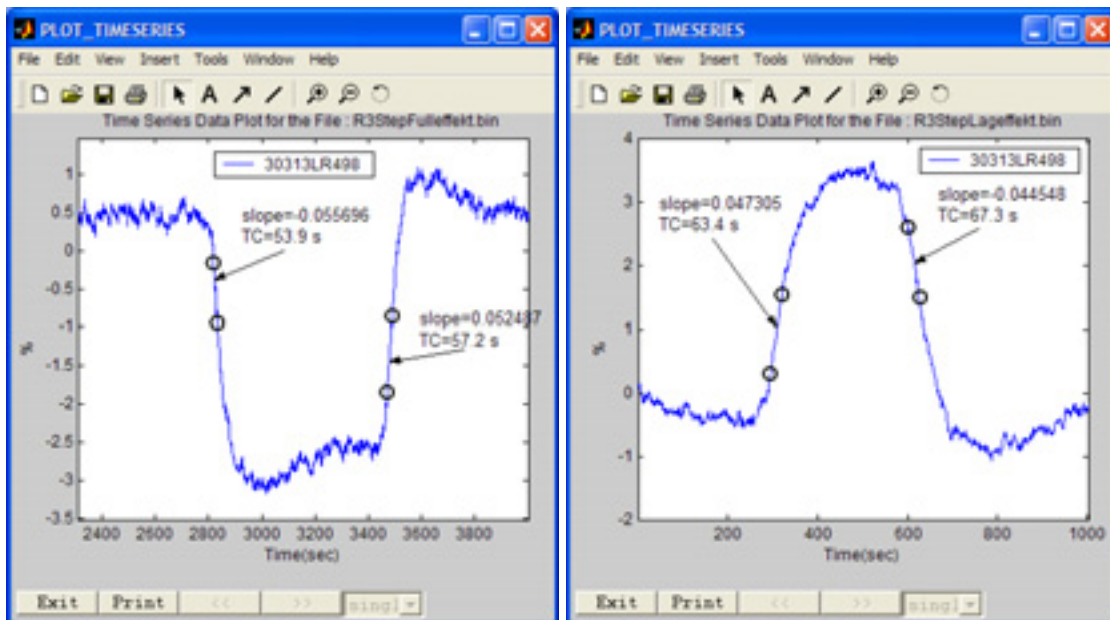
Reglertekniskt är det så att de överföringsfunktioner som ingår i den återkopplade loopen i de allra flesta fall har negativa fasbidrag. Dit hör filtret i anslutning till mittvärdesväljaren som ger -8 grader och dynamiken för positionsregleringen som ger -3.4 grader vid $\omega_c = 0.023$ rad/s, se Figur 7.4. Dessa egenskaper kan oftast inte ändras. Det som står till buds är de justeringar som kan göras med regulatorns parametrar.

Eftersom nivåreglersystemet är så stabilt så finns det potential att göra nivåreglersystemet snabbare om så är önskvärt.

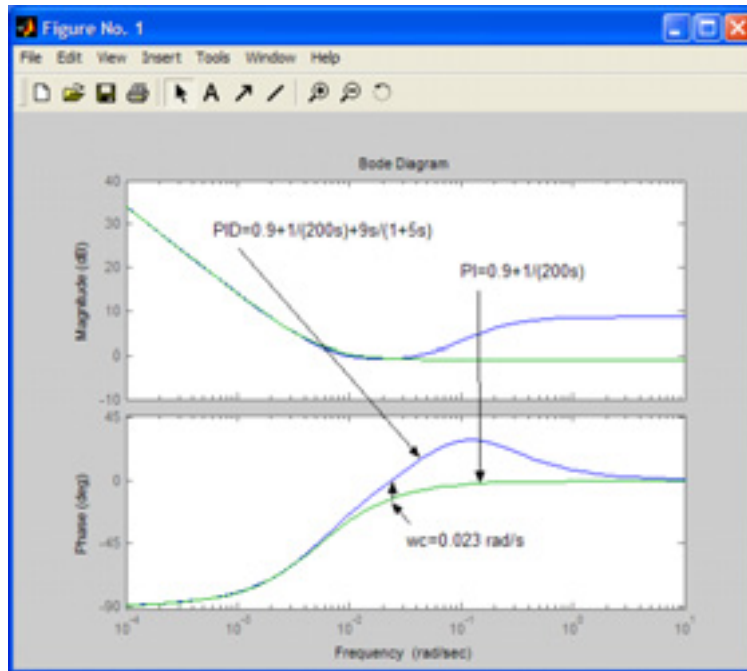
Genom att höja förstärkningen hos nivåregulatorn blir reglersystemet snabbare ty då ökar ω_c . Därmed skulle fasmarginalen minska och då skulle derivatafunktionen kunna bidra med mer positiv fasvridning än de blygsamma 12 grader som gäller idag. Grafiskt innebär detta att den lilla pilen vid $\omega_c = 0.023$ rad/s flyttas till höger i diagrammet och därmed ger PID-regulatorn mer positivt fasbidrag i förhållande till PI-regulatorn.



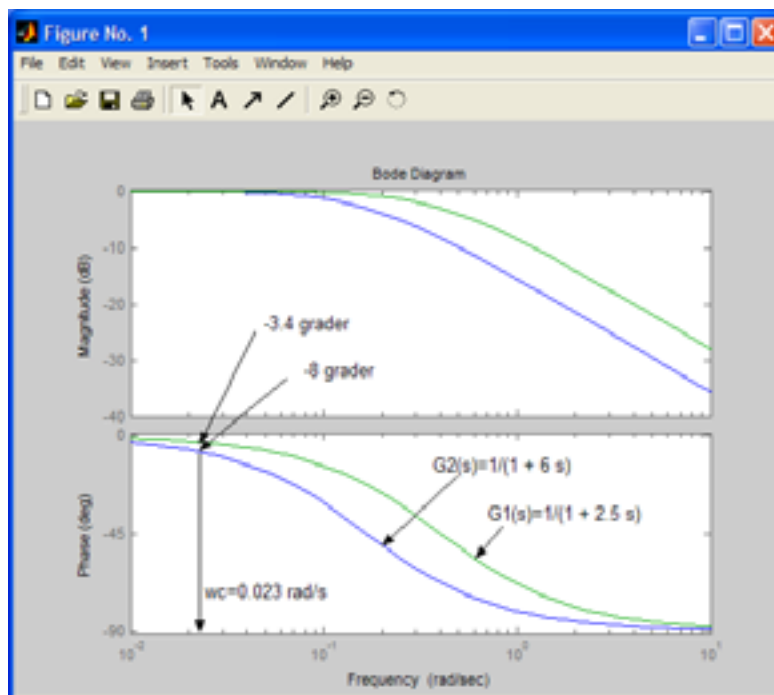
Figur 7.1 Stegsvartstest av nivåregleringssystemen för Ånggenerator 1 och 3 vid hög effekt. Stegstörning där börvärdet minskar 3 % kortvarigt (vänster diagram). Stegstöringen av nivåreglersystemen för samtliga ånggeneratorer vid låg effekt presenteras i höger diagram. I detta fall är det stegstöringar med ökande nivå. De filtrerade nivåsignalerna presenteras i diagrammet.



Figur 7.2 Stegsvartstesterna samt uppskattade tidskonstanter vid full effekt för Ånggenerator 3 (vänster diagram). Motsvarande tidskonstanter vid låg effekt för Ånggenerator 3 (höger diagram).



Figur 7.3 Bodediagram för gällande nivåregulator PID samt motsvarande regulator där derivatafunktionen kopplats bort. Genom att använda PID fås en positiv fasvridning med +12 grader vid $\omega_c = 0.023$ rad/s.



Figur 7.4 Negativa fasbidrag från I&C-filter för nivåsignalerna G2 med tidskonstanten 6 sekunder samt positionsreglersystemet G1 med tidskonstanten 2.5 sekunder.

8 Stegsvartstest av DP-regleringen

I tidigare kapitel i rapporten har det påpekats att nivåregleringen, som djupast sett styr matarvattenventilen, har koppling till DP-regleringen. Orsaken är att differenstrycket över matarvattenventilen påverkas av matarvattenpumparnas pådrag. I föreliggande kapitel kommer vi att studera DP-regleringen praktiskt via stegstörningsprov. Resultaten av studien framgår av Figur 8.1–8.3.

Stegstörningen av DP-börvärdet samt responsen hos den registrerade signalen DP för ÅG-1 presenteras i de övre graferna i Figur 8.2. Den högra av graferna visar det manuella börvärdet medan den vänstra av graferna visar hur DP-signalens ärvärde ökar från cirka 8 till 10 bar. Börvärdet reduceras sedan till ursprungsnivån efter cirka 10 minuter. Också denna stegändring finns med i mätdata.

Responssnabbheten för DP-regleringen har identifierats och finns återgiven i Figur 8.1. Börvärdet har ansatts som insignal och DP-signalerna som tre olika utsignaler. Därefter har stegsvartstest genomförts för var och en av de tre systemen. Resultatet visas i Figur 8.1. $TC = 12.8$ sekunder för ÅG-1, $TC = 12.8$ sekunder för ÅG-2 och $TC = 12.5$ sekunder för ÅG-3. Egentligen har DP-regleringen bara en utsignal och det är min DP men i brist på denna utsignal har de individuella DP-signalerna nyttjats vid identifieringen, se Figur 2.3. Resultaten för de olika DP-signalerna är dock mycket samstämmigt, $TC \approx 12.8$ sekunder. För övrigt kan sägas att regleringen är stabil utan översväng vid insvängningsförloppet, se Figur 8.1 och den övre vänstra grafen i Figur 8.2. Flödesregulatorns respons när DP ändras stegformigt framgår av Figur 8.3 som visar samtidig registrering av de bågige signalerna under stegstörningsprovet.

Den vänstra av de nedre graferna i Figur 8.2 visar nivåsignalen för ÅG-1. Det är helt uppenbart att höjningen av DP över matarvattenventilen leder till att nivån i ånggeneratorn ökar. Detta är fullt rimligt eftersom tryckökningen leder till en flödesökning. Den ökade nivån som syns i grafen vid 100 sekunder reduceras sedan ner till ursprungsnivån. Denna reduktion åstadkoms av nivåreglersystemet. Det är intressant att konstatera att den snabba DP-regleringen ger tydlig störning på vattennivån som den långsammare nivåregleringen sedan eliminerar. Efter cirka 700 sekunder i nämnda graf kommer den omvända störningen i DP som leder till nivåreduktion och som i sin tur elimineras av nivåregleringen.

Det förtjänar slutligen att påpekats att responstiden för DP-regleringen är snabb med $TC \approx 12$ sekunder i jämförelse med nivåregleringens långsamma $TC \approx 60$ sekunder.

8.1 Dynamiska krav och deras uppfyllelse

Av Kapitel 7 och 8 framgår de dynamiska egenskaperna hos nivåregleringen och DP-regleringen. I detta kapitel ges en kort jämförelse mellan uppställda krav och registrerade reglertekniska resultat som framgår av Referens 11 och 12. För kondensorregleringen saknas de börvärdestester som beskriver reglersystemets prestanda. Dessutom saknas krav på såväl dämpning som responstid för regleringen av balansen mellan kondensor 31 och 32.

Nivåregleringen vid 3 % börvärdessteg:

- a) Dämpfaktor > 3 (motsvarar $DR < 0.33$).

b) Responstiden < 2 min.

Utfall för nivåregleringen:

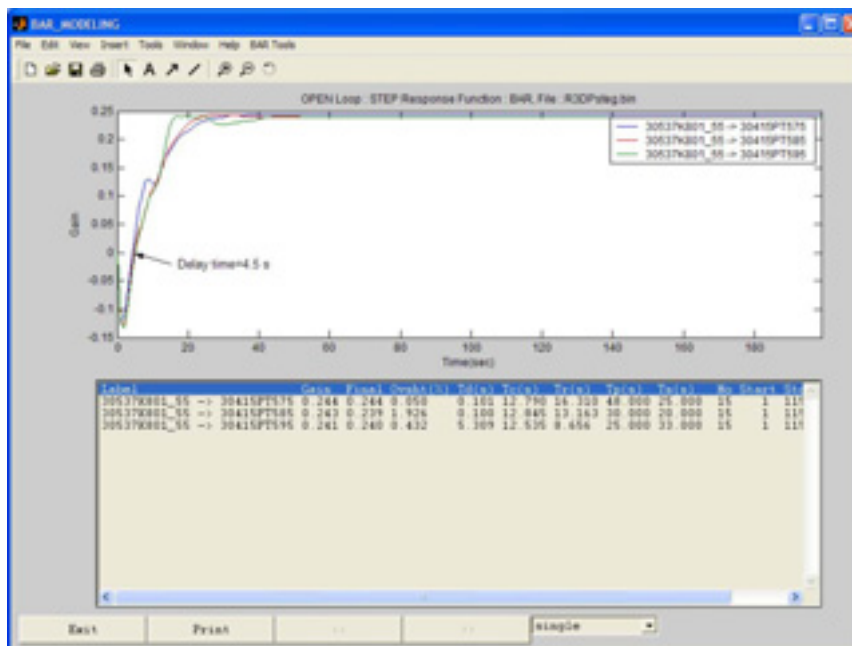
- a) liten översväng, bättre dämpning än kravet.
- b) TC = 60 s. Responstiden inkluderande eventuell dödtid kunde ej fastställas ty börvärdet saknas som mätsignal.

DP-regleringen vid 2 bar börvärdessteg:

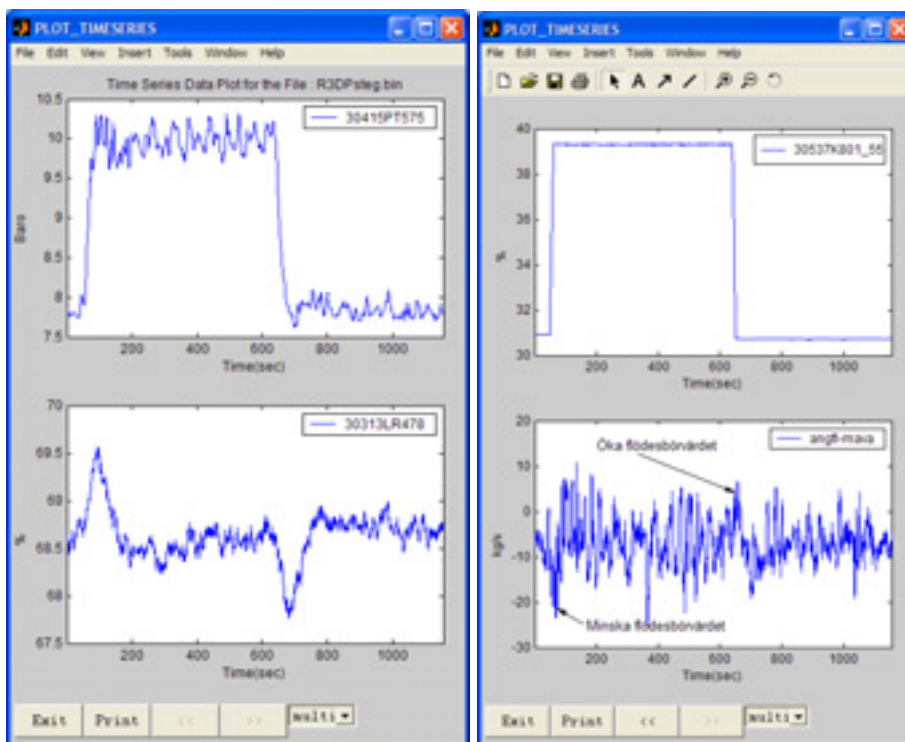
- a) Dämpfaktor > 3 och översväng < 30 %
- b) Responstid saknas

Utfall för DP-regleringen:

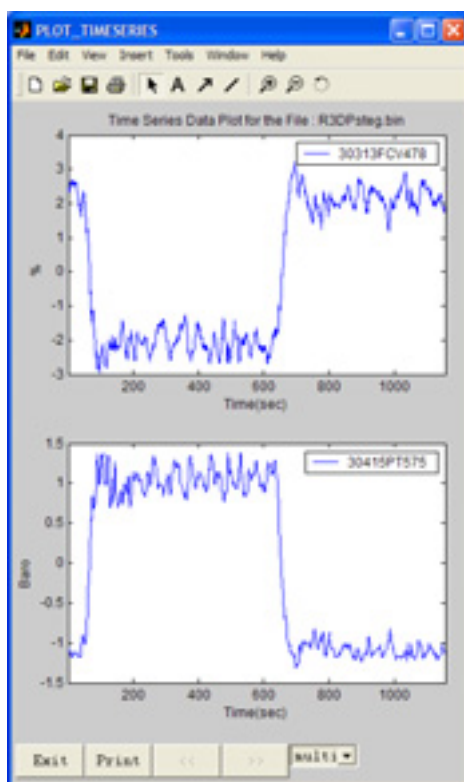
- a) Liten eller ingen översväng, därmed är krav a uppfyllt.
- b) TC = 13 sekunder. (krav saknas)



Figur 8.1 Identifiering av DP-regulatorns dynamik. Figuren visar stegsvarstest av den identifierade modellen med DP-börvärdet som insignal och DP som utsignal för de tre matarvattenventilerna.



Figur 8.2 De övre diagrammen visar DP för ånggeneratorventilen till ÅG-1 till vänster och regulatorns stegformade börvärde till höger. De nedre diagrammen visar vattennivån till vänster och skillnaden mellan ångflöde och matarvattenflöde (30313FT474-30313FT474) också för ÅG-1.



Figur 8.3 Utsignalen från flödesregulatorn (övre graf) samt motsvarande signal för DP över matarvattenventilen (undre graf) för Ånggenerator 3.

9 Växelverkan mellan DP-regleringen och Nivåregleringen

Nivå- och flödesregleringen har en framkoppling för att bekämpa störningar hos nivån i ånggeneratoren. Obalans mellan matarvattenflödet och ångflödet ökar eller minskar börvärdet till flödesregulatorn, se Figur 2.2.

I samband med stegstörningen av DP-regleringen som beskrevs i föregående kapitel visades skillnadssignalen mellan ång- och matarvattenflödet för Ånggenerator 1, se den nedre högra grafen i Figur 8.2. En liten minskning av flödesbörvärdet införs efter cirka 100 sekunder och en motsvarande liten ökning av flödesbörvärdet efter cirka 700 sekunder. I övrigt är oscillationen hos skillnadssignalen förhållandevis stor.

Vi kan konstatera att framkopplingen av flödesskillnaden i sitt nuvarande skick inte fullt ut kan bekämpa snabba störningar hos DP över matarvattenventilerna. Orsaken kan helt enkelt vara att flödesregleringen inte är snabb nog för denna uppgift.

Allmänt kan man säga ett reglersystem har till uppgift att undertrycka störningar som har inverkan på den reglerade storheten. Störningar som har inverkan på regleringen och som samtidigt är mätbara bör dock användas för framkoppling på sådant sätt att störningens inverkan minimeras. I detta fall bör man undersöka möjligheten att framkoppla DP-signalen. Detta skulle kunna göras som en modifiering av den nuvarande matarvattenregleringen. I Figur 9.3 beskrivs GSE:s förslag till ändring.

Positionsregleringen av matarvattenventilen kompenseras och öppnas mer om $DP < 8$ bar och det omvända sker om $DP > 8$ bar, se Figur 9.3. Positionsörvärdet kompenseras $+/-$ utifrån flödesregulatorns framräknade örvärde. Överföringsfunktionen $H(s)$ i figuren filtrerar framkopplingens dynamik så att önskvärd funktionalitet erhålles. Denna modifiering införs för samtliga tre ånggeneratorer. På så sätt kommer dynamiken mellan nivåregleringen och DP-regleringen att minska. Och som slutresultat fås mindre variationer hos vattennivån i respektive ånggenerator vid en transient. Lämpligen bör den föreslagna framkopplingen och överföringsfunktionen $H(s)$ beräknas och därefter utprovas med simulering.

Den föreslagna förändringen av nivåregleringen bedöms väsentligt påverka transienten med lastbortfall till 50 % och ge mindre avvikelser från nivåörvärdet, eftersom DP under denna transient varierar mellan 5 och 13 bar.

Det finns dock en viss risk med den föreslagna framkopplingen av DP-signalen och det är att reglersystemet för nivån därmed blir snabbare i jämförelse med ursprunglig design. På så sätt kan i sämsta fall svängningar uppstå som idag inte finns mellan de två reglersystemen. Figur 9.1 visar interaktionen mellan de bägge reglersystemen.

Den slutligen radikalaste lösningen är att införa multivariabel reglering av matarvattnet och detta kommer att beskrivas närmare i Kapitel 9.1.

9.1 Multivariabel reglering

De tre systemen för DP-reglering, nivåreglering och kondensorreglering interagerar med varandra. Kondensorregleringen är långsam och är därför förhållandevis harmlös i sammanhanget. DP-regleringen och nivåregleringen däremot påverkar varandra väldigt tydligt. En ökning i ventilöppning för att få ett större flöde till ånggeneratoren påverkar

differenstrycket över ventilen. När differenstrycket ändras av DP-regulatorn påverkas också matarvattenflödet till ånggeneratoren.

Regleringen av matarvattnet i Ringhals 3 är utformad med två helt separata reglermål. Dessa är:

- Styr varvtalet på matarvattenpumparna så att minimum DP över matarvattenventilerna blir 8 bar.
- Styr matarvattenventilen så att vattennivån överensstämmer med dess börvärde för varje individuell ånggenerator.

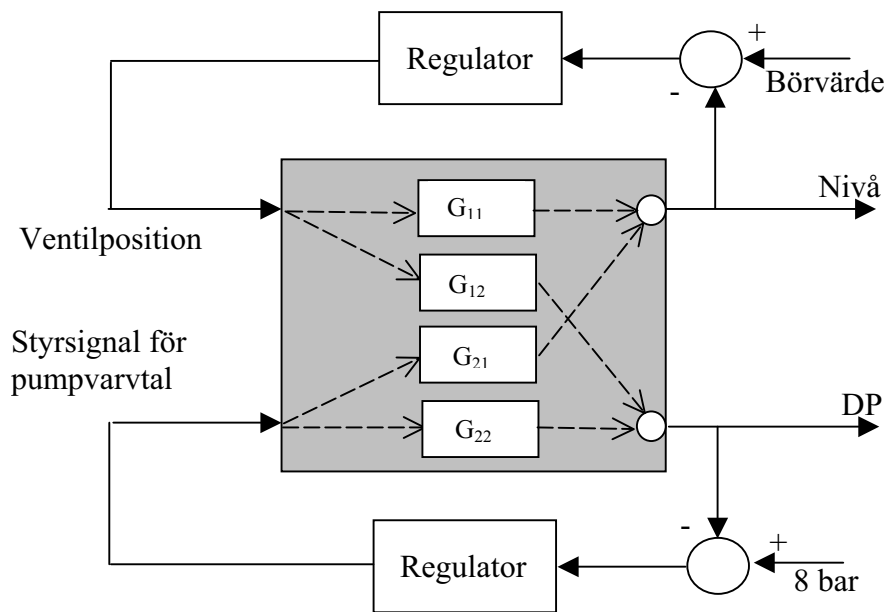
Reglersituationen kan förklaras med det förenklade blockschemat i Figur 9.1. De två individuella regulatorerna styr ventilpositionen respektive pumpvarvtalet helt oberoende av varandra. Det grå blocket i figuren motsvarar processen som i detta fall är ånggeneratoren med dess matarvattenloop. Figuren är illustrativ eftersom den visar hur ett tvådimensionellt reglerproblem löses med två separata reglersystem.

Överföringsfunktionerna G_{11} och G_{22} kallas i reglertekniska sammanhang huvudöverföringarna, medan G_{12} och G_{21} kallas interaktionselementen. I många fall där interaktion förekommer kan ett särkopplingsfilter beräknas. Detta placeras i kaskad framför det grå blocket i Figur 9.1. Filtret beräknas så att det reducerar inflytandet mellan de bägge processsignalerna. Efter införandet av särkopplingsfilter kan sedan två separata reglersystem införas för att reglera processen och denna gång med betydligt bättre resultat.

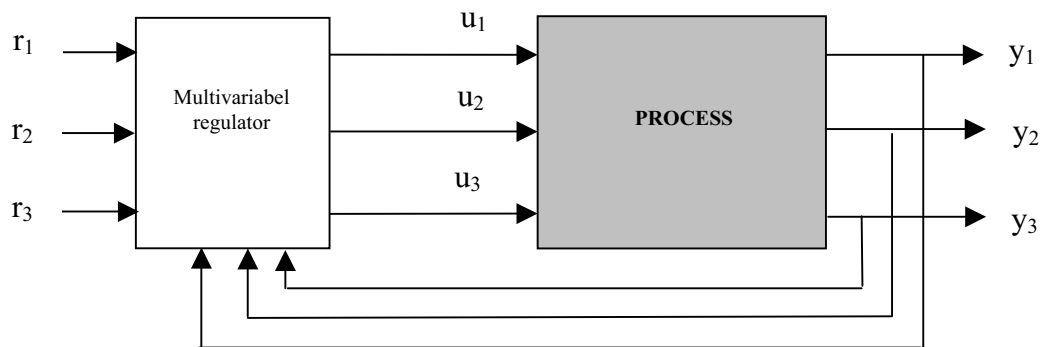
Metoden med särkopplingsfilter har en begränsning. Den fungerar inte när processen innehåller integrerande egenskaper.

I detta fall med nivåreglering förekommer tyvärr integration hos processen och det omöjliggör användandet av tekniken med särkopplingsfilter.

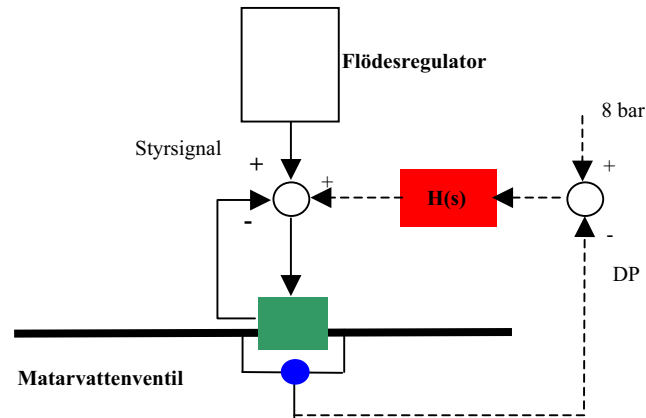
Det mest radikala är därför att beskriva processen med så kallade tillståndsvariabler. Detta innebär att modelldynamiken beskrivs med en uppsättning första ordningens styrda ordinära differentialekvationer. En multivariabel regulator kan sedan utvecklas som beräknar de individuella styrsignalerna med målet att hålla vattennivån samt DP över ventilerna konstant. Figur 9.2 visar ett exempel med en multivariabel regulator för en process som beskrivs med tre tillståndsvariabler. Regulatorn beräknar tre individuella styrsignaler (u_1 , u_2 , u_3) som var och en är en funktion av alla tre ingående tillståndsvariabler (y_1 , y_2 , y_3) samt de tre börvärdena (r_1 , r_2 , r_3). Fördelen med tillståndsvariabelreglering är att en enda regulator nyttjas som tar samtidig hänsyn till de olika reglermålen. Teorin för syntes av en multivariabel regulator är dock mer komplicerad än den Bodeanalys som använts i denna rapport.



Figur 9.1 Processen har två utsignaler och två insignaler och dessutom interaktion mellan variablerna.



Figur 9.2 Multivariabel reglering av en process med tre insignaler (u_1 , u_2 och u_3) och tre utsignaler (y_1 , y_2 och y_3). Regulatorn beräknar de individuella styrsignalerna med hänsyn till börvärdena (r_1 , r_2 och r_3) men också med hänsyn till de andra signalerna.



Figur 9.3 Framkoppling av DP-signalens avvikelse från 8 bar till ventilens positions-reglersystem för att reducera inflytandet från DP på matarvattenflödet.

10 Reglertekniska bedömningar och förslag

I föreliggande kapitel ges en bedömning av matarvattenregleringen vid Ringhals 3. Den grundar sig på mätdata som ställts till förfogande inom projektet. Både styrkor och svagheter hos det nuvarande reglersystemet kommenteras. Sammanfattningsvis kan sägas att tre skilda reglersystem med olika syften påverkar matarvattenflödet i Ringhals 3:

- DP-regleringen styr varvtalet på matarvattenpumparna så att minimum DP över matarvattenventilerna blir 8 bar.
- Nivåreglering styr matarvattenventilen så att vattennivån överensstämmer med dess börvärde för varje individuell ånggenerator.
- Kondensorregleringen kompenserar varvtalet hos matarvattenpumparna så att det blir lika nivå i kondensorererna för turbin 31 och 32.

DP-regleringen är snabbast med tidskonstanten 13 sekunder. Stegsvartesterna påvisar att reglersystemet är stabilt utan besvärande översväng eller oscillationer.

Nivåregleringen reagerar med tidskonstanten 60 sekunder vid stegsvartest med enbart liten översväng och god dämpning. Kondensorregleringen till sist är långsam i sin reaktion och med exempel visas att en nivåskillnad mellan kondensorererna av 25 cm elimineras på 700 sekunder.

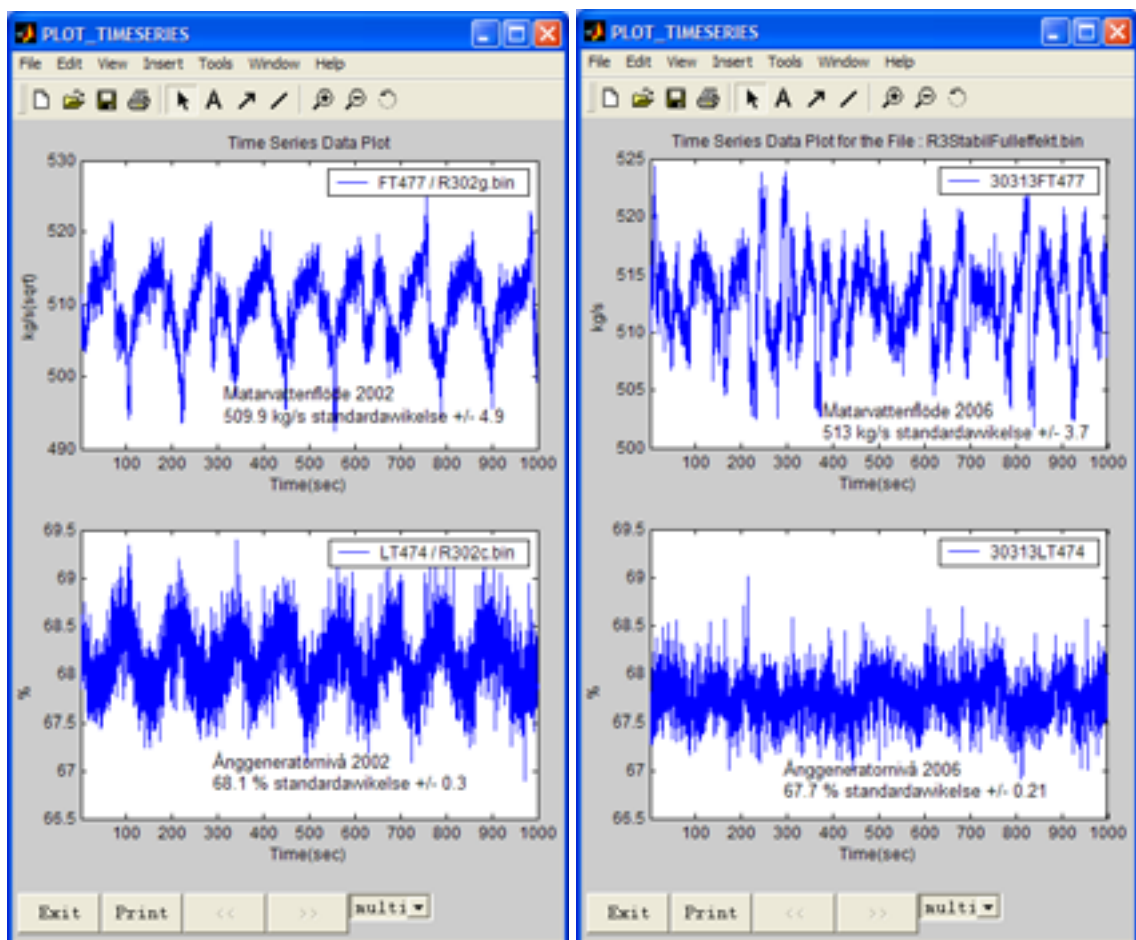
Figur 10.1 visar resultat med matarvattenflöde (FT477) och ånggeneratornivå (LT474) registrerade 2002 och 2006. Det är uppenbart att signalernas amplituder reducerats sedan 2002. Standardavvikelsen för matarvattenflödet minskade från 4.9 till 3.7 kg/s, medan standardavvikelsen för vattennivån reducerades från 0.3 till 0.2 %. Dessutom framgår det av nivåsignalerna att den svängning i vattennivå som pågick med periodtiden 2 minuter 2002 inte förekommer 2006, se Figur 10.1. Detta är ett tydligt framsteg. Bedömningen är att förbättringen har att göra med att glapp och hysteres inte längre förekommer hos de nyinstallerade matarvattenventilerna.

Fördelar med regleringen av matarvattenflödet vid Ringhals 3

- Oscillationer i *limit cycle* som lätt kan orsakas av glapp, hysteres eller andra typer av olinjäriteter förekommer inte i de driftfall som studerats.
- En vidlyftig transient som innebar lastbortfall ner till 50 % kunde hanteras av matarvattenregleringen.
- De individuella reglersystemen för DP- och nivåreglering fungerar bra vid stegsvartest. Små eller inga översvängar förekommer vilket innebär god stabilitet. Regulatorernas integrerande funktion borgar för att regulatorerna för DP-, nivå- och kondensorregleringen når sina statiska mål.
- Icke minimumfasproblemet som ger nivåreduktion initialt när matarvattenflödet ökar har inte infunnit sig vid effektdriften i de prov som analyserats. Problemet finns dock vid manuell reglering av nivån vid låg effekt enligt uppgift från Ringhals. Enligt Referens 1 minskar undersvängningen hos nivån vid flödesökning när effekten ökar och den är knappt synlig vid 50 % effekt.

Nackdelar med regleringen av matarvattenflödet vid Ringhals 3

- Mycket stark koppling mellan DP- och nivåregleringen som nuvarande framkoppling av nivåregleringen inte helt kan hantera. Bör dock kunna förbättras med föreslagen framkoppling av DP-signalen alternativt med multivariabel reglering.
- En av tre vattennivågivare för ÅG-3 med benämningen 30313LT495 beter sig felaktigt. En intermitterent oscillation med varierande frekvens och amplituden 4 % topp–topp förekommer. Om ytterligare en av de tre redundanta nivåsensorna upphör att fungera kommer nivåregleringen att oscillera. Bedömningen är att transmittern ifråga behöver bytas ut.
- Studium av integratoruppvridning har inte kunnat göras eftersom experimenten inte innehåller mättnad hos signalerna i automatisk reglermod. Det är ovisst om regulatorerna kompenserats för integratoruppvridning. Det är viktigt att regulatorer av typen PI eller PID har kompensation för integratoruppvridning – i annat fall kan transienter drastiskt förvärras. De flesta regulatorer är utrustade med metoder för att undvika integratoruppvridning. Det fordras dock att en utrustad regulator får korrekta indata för att uppvridningen ska förhindras på rätt sätt. Ett enkelt simuleringsexempel visar att integratoruppvridning är ett sovande problem till dess den stora transienten kommer, se Figur 1.10.
- Det saknas komplett specifikation om de dynamiska krav på reglersystemen vid Ringhals 3 som förelåg vid design och drifttagning i samband med effekthöjningen 2006. Vilka var de specificerade kraven?
- De olinjära ventilkurvorna kompenseras med en *gain schedule* på utgången till flödesregulatorn för att uppnå linjäritet hos reglersystemet. Att kompenseringen verkligen lyckas verifieras inte i Ringhals 3. Detta är ett förbättringsbehov.



Figur 10.1 Matarvattenflödet FT477 registrerad 2002 i vänster övre graf. Motsvarande flödessignal från 2006 visas i den högra övre grafen. Vattennivån LT474 registrerad 2002 visas i nedre vänstra grafen, medan motsvarande nivåsignal från 2006 visas i den nedre högra grafen.

11 Slutsatser

Rapporten behandlar matarvattenregleringen vid Ringhals 3 baserat på mätdata som registrerats under sommaren 2006. Mätningarna som representerar olika prov med lastbortfall till 50 % och stegstörning av regulatorerna utgör ett bra underlag för att undersöka regulatorernas egenskaper. Samtidiga registreringar av interna regulator-signaler och redundanta processignaler medgav dessutom evaluering av förstärkningar, tidskonstanter samt integrations- och derivationstider hos flertalet av de ingående I&C-komponenterna.

Sammanfattningsvis visar undersökningen att:

- + De individuella reglersystemen för DP- och nivåreglering fungerar bra vid stegsvarstest. Små eller inga översvängar förekommer vilket innebär god stabilitet
- + En vidlyftig transient som innebar lastbortfall ner till 50 % kunde hanteras av matarvattenregleringen.
- + Glapp, hysteres eller sådana olinjäriteter som lätt kan leda till oscillationer i *limit cycle* förekommer inte i de driftfall som studerats. Icke minimumfasproblemet som ger nivåreduktion initialt när matarvattenflödet ökar har inte heller infunnit sig vid effektdriften i de prov som analyserats.
- Mycket stark koppling råder mellan DP- och nivåregleringen som nuvarande framkoppling av nivåregleringen inte helt kan hantera.
- En av tre vattennivågivare för ÅG-3 med benämningen 30313LT495 beter sig felaktigt. Bedömningen är att transmittern ifråga behöver bytas ut.
- Det är ovisst om regulatorerna kompenserats för integratoruppvridding vid Ringhals 3. Det är viktigt att regulatorer av typen PI eller PID har kompensation för integratoruppvridding i annat fall kan en transient drastiskt förvärras. Ett allmänt simuleringsexempel visar att integratoruppvridding är ett sovande problem till dess den stora transienten kommer.
- Det saknas komplett specifikation om de statiska och dynamiska krav på reglersystemen vid Ringhals 3 som förelåg vid design och drifttagning i samband med effekthöjningen 2006. Dessa krav är viktiga för att fastställa gränsen för underhåll.
- De olinjära ventilkurvorna kompenseras på utgången till flödesregulatorn för att uppnå linjäritet hos reglersystemet. Att kompenseringen verkligen lyckas verifieras inte i Ringhals 3. Detta är ett förbättringsbehov.

12 Referenser

- 1 M.V. Kothare et al. "Level Control in the Steam Generator of a Nuclear Power Plant". IEEE transactions on control systems technology, Vol.8, No.1, January 2000.
- 2 P.J. Thomas et al. "Analysis of limit cycling on a boiler feedwater control system", in Proc. Int. Conf. Boiler Dynamics Contr. Nucl. Power Stations, London,U.K., 1985,pp. 89-96.
- 3 A.M. Hasanul Basher, South Carolina State University and J. March-Leuba, Oak Ridge National Laboratory. "Development of a Robust Model-Based water Level Controller for U-tube Steam Generator." Prepared for DOE under contract DE-AC05-00OR22725.
- 4 K. J. Åström. Reglerteori. Almqvist & Wiksell/Gebbers Förlag AB, Stockholm 1968.
- 5 K. J. Åström. Reglerteknik olinjära system. Föreläsningar vid LTH 1968. TLTH/VBV
- 6 Bertil Thomas. Modern Reglerteknik. Almqvist & Wiksell 1992.
- 7 Tore Hägglund. Praktisk processreglering. Studentlitteratur 1997.
- 8 K. J. Åström. Reglerteknik en elementär introduktion. Kapitel 5 PID reglering. Institutionen för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola, 1982.
- 9 Jonas Olandersson. GREAT/R3 – Provrapport. Systemprov nivå II 1916196/2.0. 2006-09-15.
- 10 Andreas Nordquist. GREAT/R3 – Provrapport. Idrifttagningsprov nivå II. Enturbinsnabbstopp utan reaktorsnabbstopp. 1916159/2.0
- 11 Jonas Olandersson. GREAT/R3 – Provrapport. Systemprov nivå II. Kontroll av ånggeneratorernas nivåreglering. 1915843/2.0. 2006-09-15.
- 12 Jonas Olandersson. GREAT/R3 – Provrapport. Systemprov nivå II. Kontroll av varvtalsstyrda matarvattenpumpar. 1914849/2.0. 2006-12-07.

www.ski.se

STATENS KÄRNKRAFTINSPEKTION
Swedish Nuclear Power Inspectorate

POST/POSTAL ADDRESS SE-106 58 Stockholm

BESÖK/OFFICE Klarabergsviadukten 90

TELEFON/TELEPHONE +46 (0)8 698 84 00

TELEFAX +46 (0)8 661 90 86

E-POST/E-MAIL ski@ski.se

WEBBPLATS/WEB SITE www.ski.se