

<b>LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY</b> DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL Box 725 S 220 07 Lund 7 Sweden		<b>Document name</b> Master thesis
		<b>Date of issue</b> September
		<b>Document number</b> CODEN:LUTFD2/(TFRT-5313)/1-047/(1984)
<b>Author(s)</b> Anders Jansson		<b>Supervisor</b> Björn Wittenmark
		<b>Sponsoring organization</b>
<b>Title and subtitle</b> Beräkning av regulatorparametrar med hjälp av i regulatorn inbyggd processmodell. (Computation of regulator parameters using gain scheduling.)		
<b>Abstract</b> This master thesis describes a way to construct a controller with a built-in model of the controlled process, making it possible to increase the performance over the whole working-area. This resulted in a gain-scheduled controller.  The approach has been applied to the control of a hydro-power station, which is a nonlinear and non-minimum phase process.  The aim was to improve the performance of frequency control, on disturbances from the connected grid.  This resulted in a built-in linear model whose process variables change with the working point of the hydro power process.  Controller parameters are computed from this linear model and used for the control of the non-linear process.  Simulations for the comparison between the hydro power system with a conventional controller e.g. PID with fixed parameters, and the described controller have been made.  This master thesis has been done at the Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology. Initiator was ASEA Otkus, Lund.		
<b>Key words</b>		
<b>Classification system and/or index terms (if any)</b>		
<b>Supplementary bibliographical information</b>		
<b>ISSN and key title</b>		<b>ISBN</b>
<b>Language</b> Swedish	<b>Number of pages</b> 47	<b>Recipient's notes</b>
<b>Security classification</b>		

CODEN : LUTFD2/(TFRT-5313)/1-047/(1984)

BERÄKNING AV REGULATORPARAMETRAR MED HJÄLP AV I REGULATORN  
INBYGGD PROCESS MODELL

ANDERS JANSSON

DEPARTMENT OF AUTOMATIC CONTROL  
LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY

SEPTEMBER 1984

### Abstract

This master thesis describes a way to construct a controller with a built-in model of the controlled process, making it possible to increase the performance over the whole working-area. This resulted in a gain-scheduled controller.

The approach has been applied to the control of a hydro-power station, which is a nonlinear and non-minimum phase process.

The aim was to improve the performance of frequency control, on disturbances from the connected grid.

This resulted in a built-in linear model whose process variables change with the working point of the hydro power process.

Controller parameters are computed from this linear model and used for the control of the non-linear process.

Simulations for the comparison between the hydro power system with a conventional controller e.g. PID with fixed parameters, and the described controller have been made.

This master thesis has been done at the Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology.  
Initiator was ASEA Otkus, Lund.

Beräkning av regulatorparametrar mha i regulatorn inbyggd process model

Anders Jansson

Institutionen för reglerteknik vid  
Lunds Tekniska Högskola

## Innehållsförteckning

1. Inledning
  2. Processbeskrivning
    - 2.1 Fysikalisk bakgrund
    - 2.2 Simuleringsmodeller
    - 2.3 Simuleringar med simuleringsmodellerna
  3. Parameterstyrning i det allmänna fallet
    - 3.1 Allmänt
    - 3.2 Drifttillstånden
    - 3.3 Parameterberäkningen
    - 3.4 Svårigheter och nackdelar med parameterstyrningen
  4. Parameterstyrd regulator för vattenkraftsstationen
    - 4.1 Förutsättningar
    - 4.2 Linjärisering
    - 4.3 Observeraren
    - 4.4 Polplacering
  5. Simuleringar med parameterstyrda regulatorn
    - 5.1 Implementeringen av regulatorn
    - 5.2 Resultat
  6. Sammanfattning
  7. Litteraturreferenser
- 
1. Fullständig linjärisering
  2. Observeraren

## APPENDIX

## 1. Inledning

Detta examensarbete har utförts vid institutionen för Reglerteknik vid Lunds Tekniska Högskola på initiativ av ASEA Otkus, Lund. Syftet har varit att i en regulator bygga in kännedom om den reglerade processen för att på så sätt förbättra regleringen.

Som "angrepps-strategi" har valts sk parameterstyrning (eng. gain-scheduling). Detta innebär att parametrarna i regulatorn inte är konstanta i tiden utan tillåts variera, enligt ett dimensioneringskriterium, vid förändringar i den reglerade processens drifttillstånd, se fig 1.1

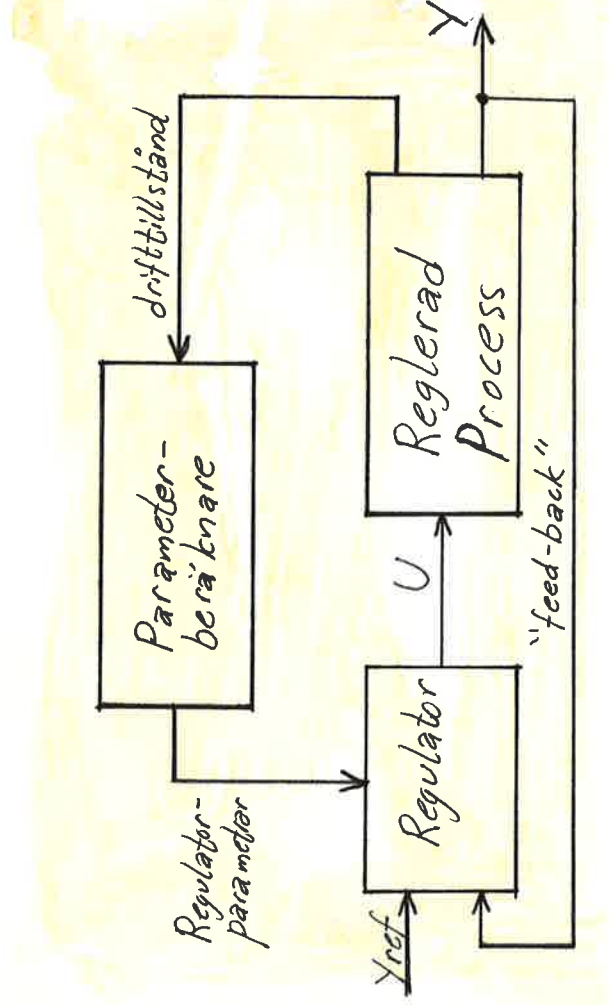


Fig 1.1

Principen för parameterstyrning.

Parameterstyrningen uppvisar en del likheter med adaptiv reglering. Dock är det vid parameterstyrning nödvändigt att man besitter goda kunskaper om den reglerade processens dynamik tex. i form av en modell.

Parameterstyrningen har tillämpats på reglering av vattenkraftverk och arbetet har utgått från ett fullständigt blockschema avsett för simuleringar av en sådan station.

Alla datorsimuleringar har utförts på SIMNON, vilket är ett kommandostyrt interaktivt programpaket för simulering av icke-linjära system, utvecklat vid institutionen för reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola.

Arbetet inleddes med en implementering av kraftverkets olika delblock i SIMNON.

Denna rapport är organiserad på följande sätt. Kapitel 2 behandlar om den reglerade processen. Först beskrives den fysikaliska bakgrunden med en inventering av de praktiskt mätbara signalerna. "Anläggningspecificika" parametrar, vilka i hög grad påverkar respektive kraftstations dynamisk uppförande diskuteras också kortfattat. Därefter beskrives simuleringsmodellerna och ett antal simuleringsresultat exemplifierar processens olinjära, ickeminium-fas uppförande. Kapitel 3 behandlar de allmänna ideerna bakom parameterstyrning tillämpat på en generell process. Konstruktionen av den parameterstyrda regulatorn för styrning av en vattenkraftsstation behandlas i kapitel 4. Här specificeras även målsättningen för regleringen och dimensioneringskriterium för beräkning av regulatorparametrarna. Vidare genomförs en linjärisering av de olinjära process modellerna. Implementeringen av den parameterstyrda regulatorn i SIMNON, med bla den linjära processmodellen, beskrives i kapitel 5 tillsammans med jämförande simuleringsresultat mellan ett system med dels konventionell och dels den parameterstyrda regulatorn. Kapitel 6 slutligen, innehåller en sammanfattning.

Handledare har varit :

Björn Wittenmark , Institutionen för reglerteknik  
Jan Tuszynski , ASEA Otkus  
Ivar Gustavsson , ASEA Otkus

## 2. Processbeskrivning

## 2.1 Fysikalisk bakgrund

Fig. 2.1.1 visar en principiell skiss över vattenkraftverket - den reglerade processen.

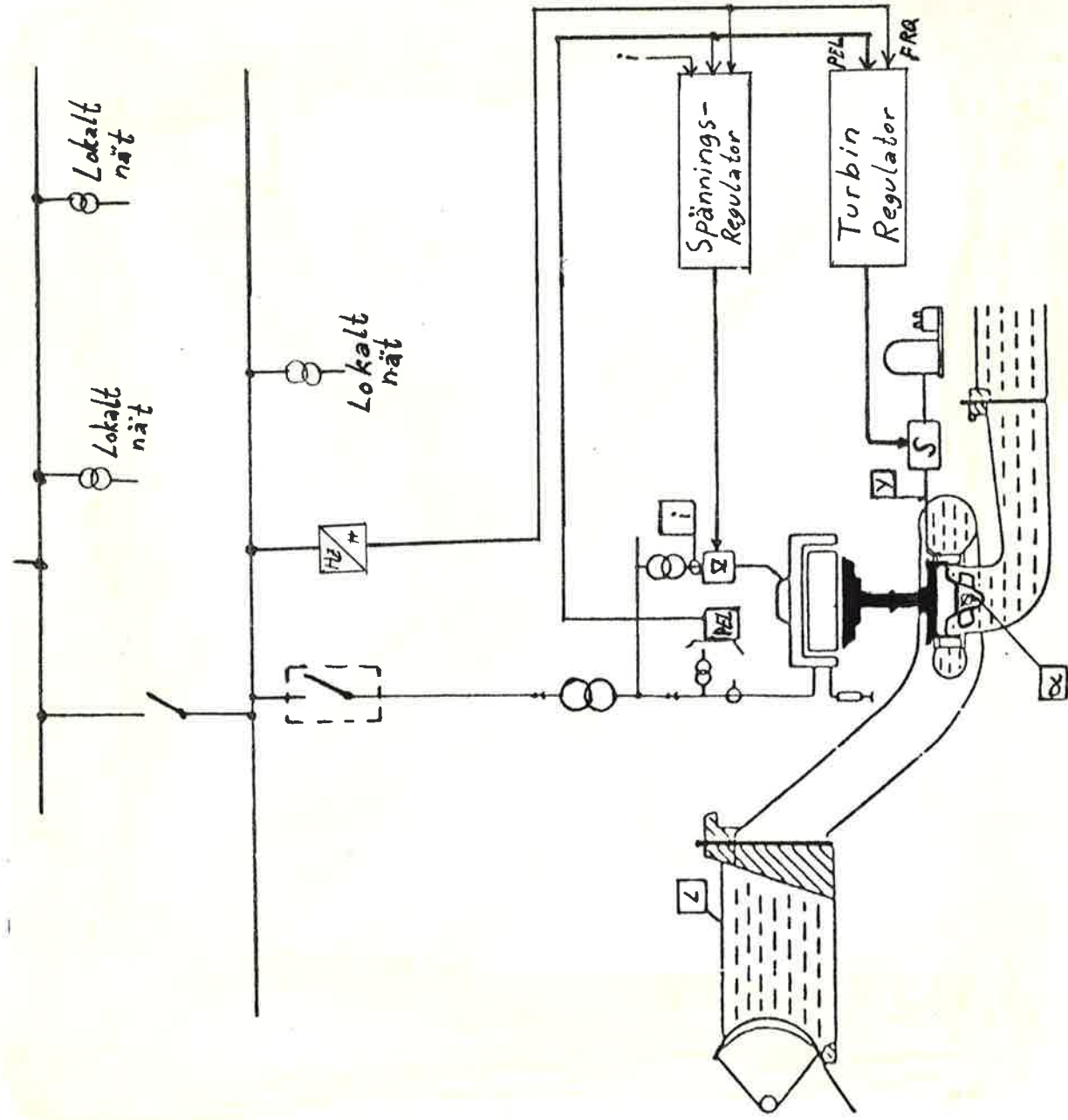


fig 2.1.1

Princip skiss över ett vattenkraftverk.



Processen har ett olinjärt beteende med icke-minfas karaktär.

Vattenvägarna utgöres av vattendammen på fallhöjden  $h$ , över turbinen, tillflödes-tunneln (=Pennstock) samt efterföljande utloppstunnel. Pådraget  $Y$ , dvs vattenflödet genom turbinen, regleras med ett antal mindre luckor i den snäckformade delen av vattentunneln vid turbinen.

Om turbinen är av Kaplan-typ så är turbinbladen vridbara, den  $s$  k kaplan vinkeln  $\alpha$ . Vridningen åstadkommes mha ett separat ställdon, för att få maximal verkningsgrad vid olika pådrag  $Y$ . Den ideala vridningsvinkeln  $\alpha$  fås via Kammen som anger referensvärdet för  $\alpha$  som funktion av pådraget  $Y$ . I normala fall är ställdonet för  $\alpha$  avsevärt långsammre än pådrags-ställdonet.

Generatorn är direkt mekaniskt kopplad till turbinen. Då generatorn är insynkroniserad på nätet beror dess dynamiska tidskonstant i hög grad på belastningens storlek samt antalet övriga insynkroniserade generatorer och belastningsfördelningen dem emellan.

Regulatorutrustningen består av turbinregulator och spänningsregulator. Detta arbete och rapport behandlar endast turbinregleringen.

Av stor vikt för att kunna åstadkomma en bra reglering är att lämpliga process-signaler och storheter kan mätas.

De för närvarande mätbara signalerna utgöres av :

- elektriska effekten (PEL)
- frekvensen (FRQ)
- pådraget  $Y$
- kaplanvinkeln  $\alpha$

Ur reglerteknisk synpunkt vore det önskvärt att även kunna mäta vattenflödet, vattentrycket och överförd mekanisk turbineffekt.

Varje vattenkraftsstation innehåller ett antal "anläggnings-specifika" parametrar, vilka i hög grad bestämmer dess dynamiska uppförande. Exempel på sådana parametrar är:

- Vattnets anloppsstid. Denna kan beräknas relativt noggrant med kännedom om vattenvägarnas fysiska utseende.

- Generatorns dynamiska tidskonstant.

- Generatorns egenförluster och tröghetsmoment

- Turbinens karakteristik över arbetsområdet.

- Ställdonens snabbhet.

Genom att i en regulator bygga in en modell av vattenkraftverket som bla innehåller dessa anläggnings-specifika parametrar hoppas man att kunna åstadkomma :

- en regulator som enkelt kan "skräddarsys" till varje vattenkraftverk genom att man vid uppstart helt enkelt matar in anläggningens parametrar till regulatorn.
- förbättrad reglering över hela arbetsområdet så man kan kompensera för processens olinjära beteende genom att regulatorn förändrar sig vid byte av arbetspunkt, och alltid är "lagom stark".

Det är för närvarande i det närmaste omöjligt att reglera kraftverk som har stora värden på Tw. För att lösa detta måste omfattande och dyrbara mindre buffertar byggas längs vattenvägarna.  
Förhoppningen är att man genom att bygga in en processmodell även här skall kunna uppnå förbättringar.

## 2.2 Simuleringsmodeller

Arbetet har utgått från ett antal blockscheman, avsedda som simuleringsmodeller, över ett fullständigt vattenkraftverk (fig 2.2.1).

Arbetet inleddes med implementering och utprovning av dessa modeller i simuleringspaketet SIMNON.

Nedan följer en beskrivning av av de olika delblocken.

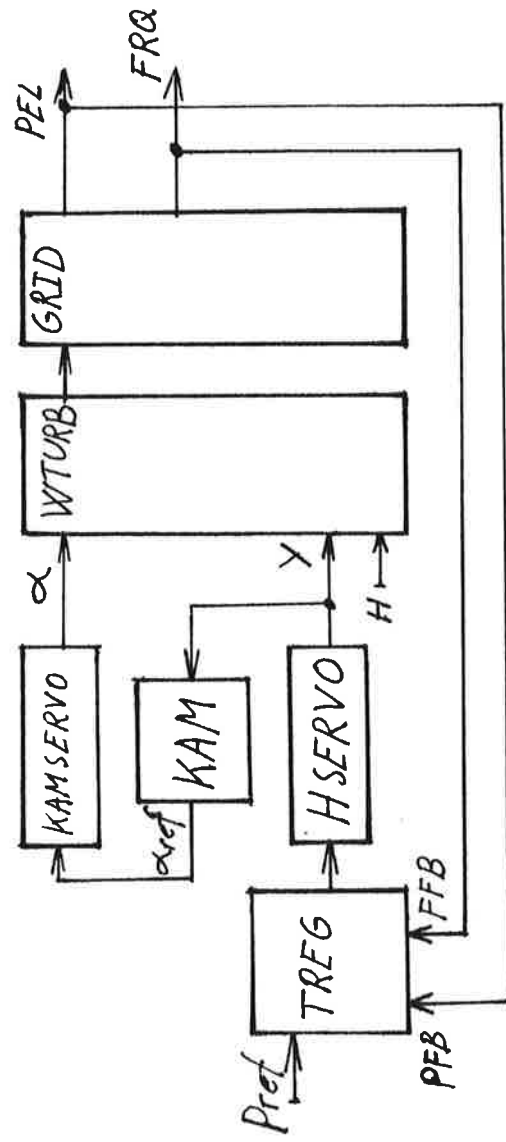


Fig 2.2.1

Simuleringsmodellens delblock.

WTURB -

innehåller modell för vattenvägarna och turbinen (fig 2.2.2). Hänsyn tas till avvikelser från den optimala kombinationen av  $Y$  och  $\alpha$  via verkningsgradsfunktionen EFF.

$f_1(y, \alpha)$  är en turbinberoende funktion som anger vattenflödet genom turbinen som funktion av  $y$  och  $\alpha$ . Utseendet på denna funktion kan variera avsevärt och fås från turbinillverkarna. Modelleras dock ofta som en stegvis linjär funktion för olika kombinationer mellan  $y$  och  $\alpha$ .

A5 och A6 är koefficienter som anger hur flöde respektive moment beror på turbinens rotationshastighet.

P och Q anger storheterna (ej praktiskt mätbara) vattenflöde respektive tryck.

PT=avgiven mekanisk turbin-effekt.

$\alpha$ =kaplan vinkeln.

Y=pådraget.

H=vattnets fallhöjd.

T1=vattnets anloppstid-tid.



KAM -

modellerar "kammen" dvs den optimala kombinationen av pådraget  $Y$  och kaplan vinkeln  $\alpha$ , för den simulerade Kaplanturbinen.

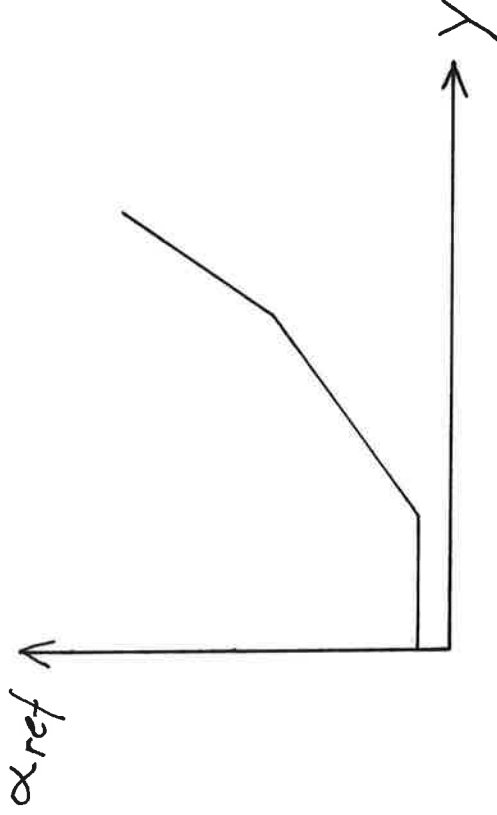


Fig 2.2.4  
principiellt utseende på kammen.

TREG -

modellerar en PID-regulator med två ingångar och en utgång.  
 PID användes pga internationella normer för kraftverks-reglering.  
 Frekvensavvikelse ( $\Delta frq$ ) och effektavvikelse ( $\Delta PEL$ ) viktas ihop till en felsignal  $e = \Delta frq + Ep \cdot \Delta PEL$ , där  $Ep$  är nätets statik.  
 Regleringen sker sedan med PID-regulatorn på denna felsignal.  
 Innehåller även framkoppling av referensvärdet samt "anti-windup" på integratordelen.  
 Z =utgång, pådrag.  
 PREF =referensvärde för elektriska effekten.  
 PFB =feed-back av elektriska effekten.  
 FFB =feed-back av elektriska frekvensen.

### 2.3 Simuleringar med simuleringmodellerna

Ett relativt stort antal simuleringar genomfördes med både det öppna och slutna systemet innan regulator-syntesen påbörjades. Anledningen var dels att få fram felfria modeller och implementeringar och dels att ge en "intuitiv känsla" för deras beteende.

Nedan visas exempel på det slutna systemets uppförande för tre olika händelser.

Samtliga parametrar har valts i enlighet med av ASEA tidigare gjorda simuleringar på ett norskt kraftverk och kan betraktas som typiska men inte på något sätt som optimala.

Stegsvar : referensvärdes ändring vid  $t=5$ . Fig 2.3.1 visar den mekaniska turbineffekten PT och fig 2.3.2 frekvensen frq.

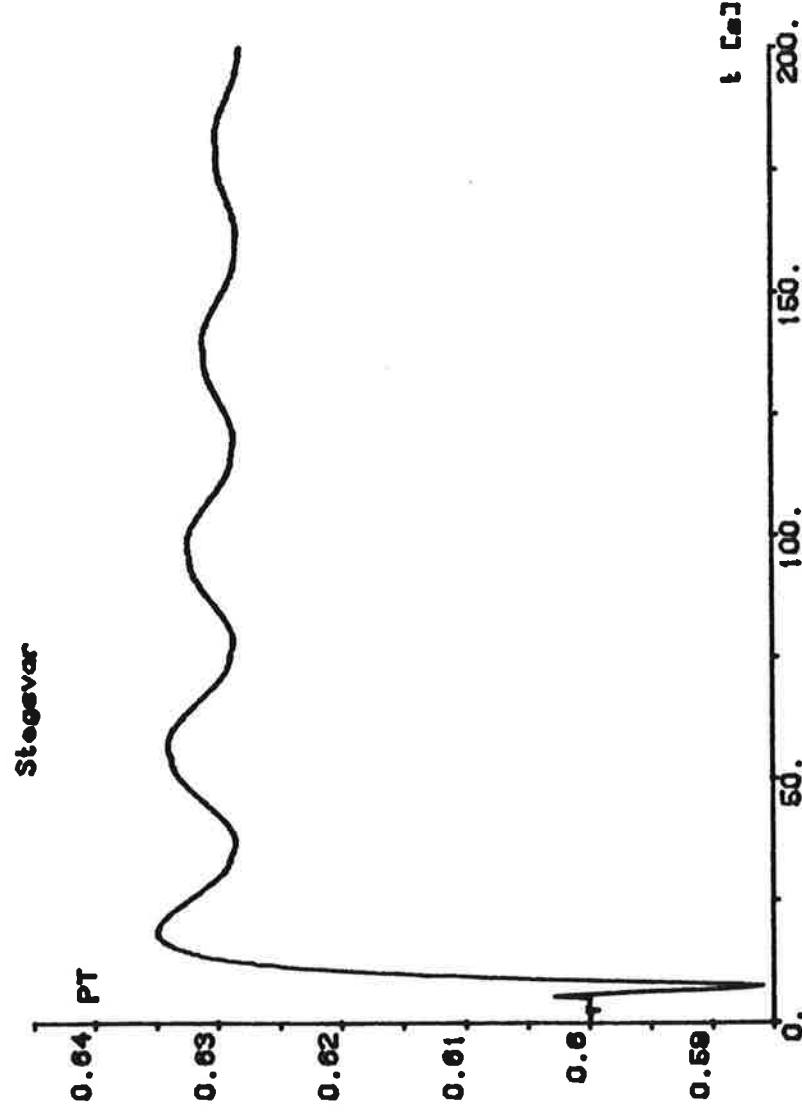


Fig 2.3.1  
Mekaniska turbineffekten PT vid steg i referensvärdet.

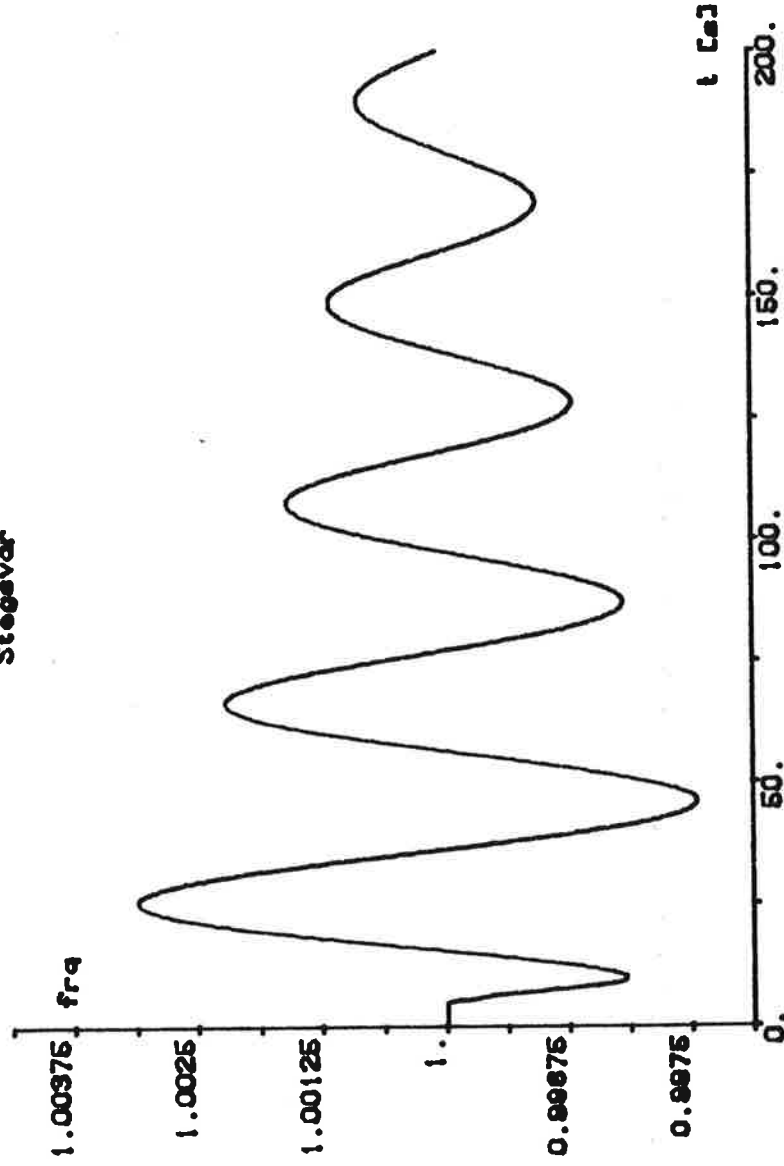


Fig 2.3.2

Frekvensen frq vid steg i referensvärdet.

Lastfrånslag :

innebär att den simulerade generatorn momentant bortkopplas från det belastande nätet utan någon referensvärdets ändring.

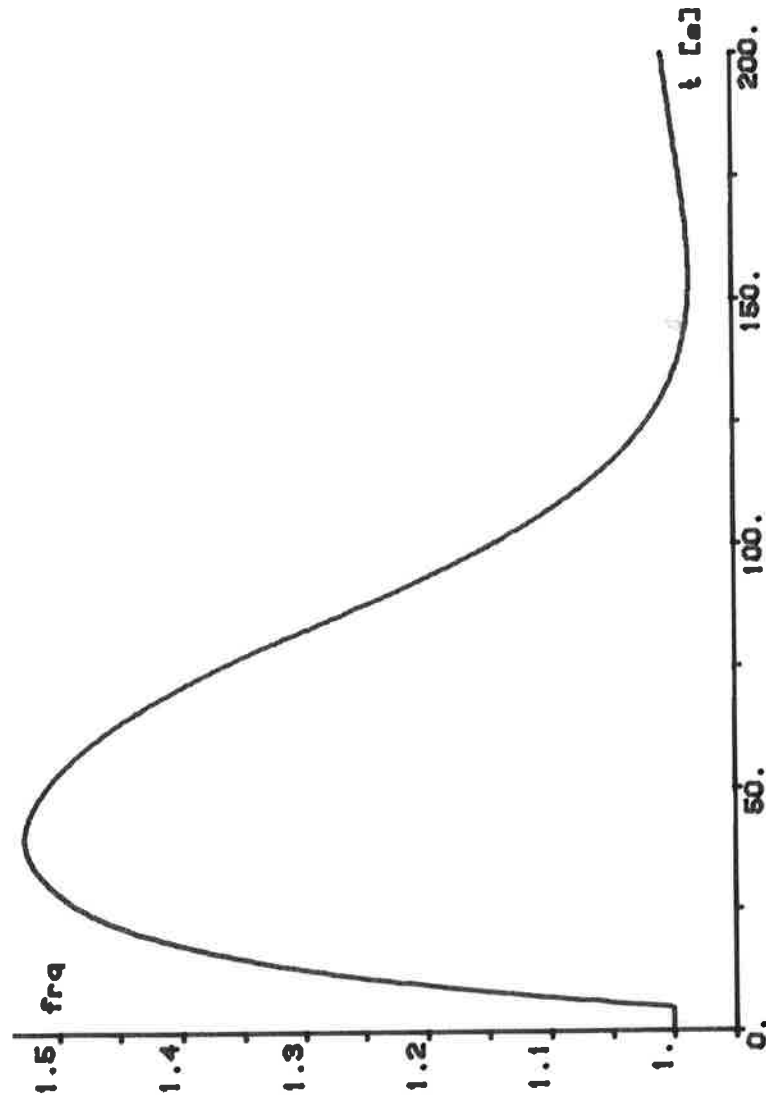


Fig 2.3.3

Frekvensen frq vid lastfrånslag.

Generator bortfall: innebär att ett lastfrånslag enl ovan utföres på en annan på nätet insynkroniserad generator. Detta medför att resterande generatorer måste ta över en större del av belastningen och stora störningar uppkommer på nätet.

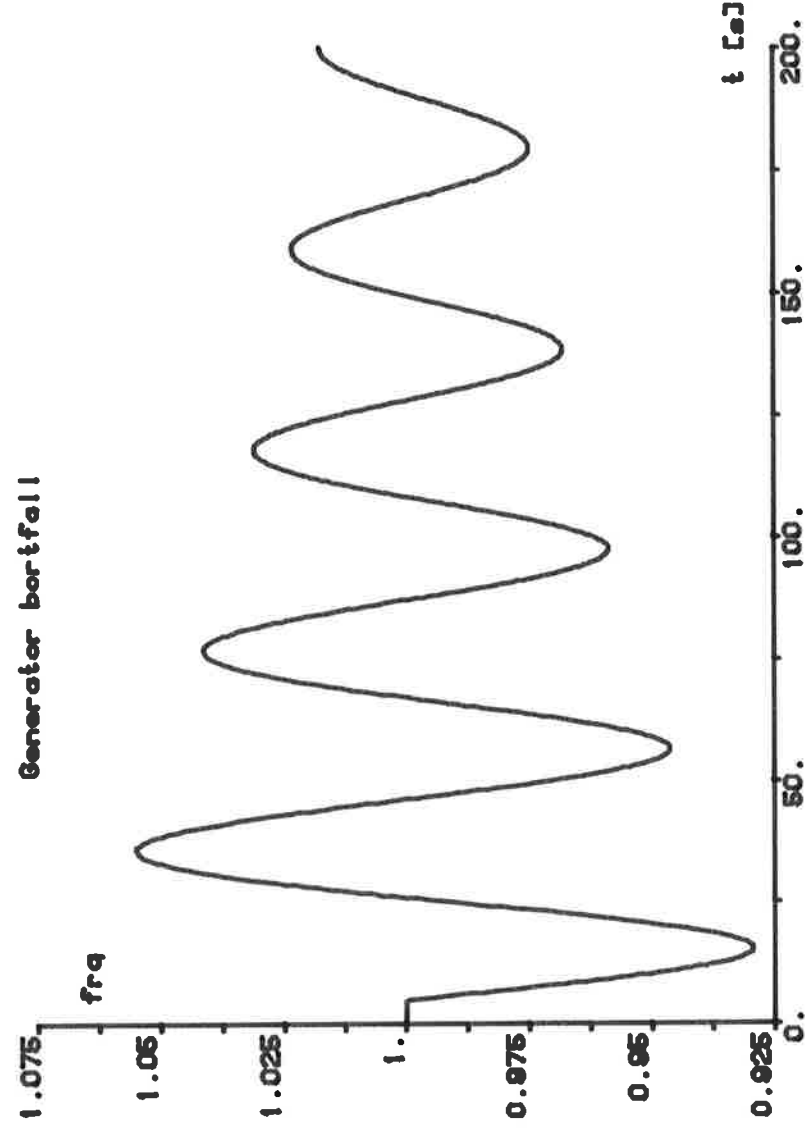


Fig 2.3.4

Frekvensen frq vid generatorbortfall

Kommentarer :

Systemets icke-minfas karaktär framgår tydligt av stegsvaret då man observerar PT - turbineffekten.

Till detta kommer kraftiga olinjäriteter som tydligt visar sig i att "responsten" på störningar och referensvärdesändringar, kraftigt varierar med arbetspunkten. Detta medför att regulatorn måste vara så "konservativt" dimensionerad att systemet förblir stabilt inom hela arbetsområdet.

Vid stora, snabba minskningar av pådraget Y har Kaplanturbinen dessutom den egenskapen att den plötsligt "tappar" den momentupptagande förmågan. Detta beror på att kamservot är så långsamt att stora avvikelser från den optimala kombinationen  $Y-\alpha$  uppstår (kombineringsfel).



### 3 Parameterstyrning i det allmänna fallet.

I detta kapitel förs ett allmänt resonemang om parameterstyrning (eng. "gain-scheduling") tillämpat på en generell process.

#### 3.1 Allmänt

Parameterstyrning innebär att någon eller några av regulatorns parametrar inte är tidskonstanta utan förändras enligt något dimensionerings-kriterium, allt efter förändringar i den reglerade processen.

Detta innebär att regulatorn har någon form av process-kännetid inbyggd. Med hjälp av denna kunskap beräknas efterhand nya lämpliga regulator-parametrar då olika förändringar i drifttillstånden detekteras.

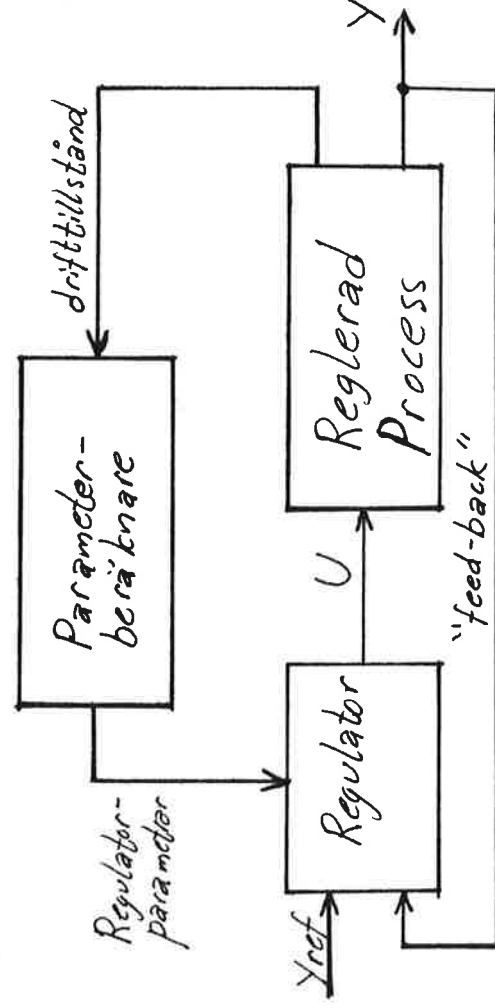


Fig 3.1.1

Princip bild för parameterstyrning

Som framgår av fig. 3.1.1 innehåller det parameterstyrda systemet två reglerkretsar. Den inre kretsen utgörs av den ordinära återkopplingslingen. Den yttre loopen utgörs av drifttillstånden och parameterberäknaren och innebär s.k. öppen styrning utan stabiliserande återföring.

En stor skillnad är dock att man vid parameterstyrningen på förhand, måste ha en bra modell av processen som skall regleras att utgå ifrån vid dimensioneringen. Modellen skall vara bra i den meningen att den väl beskriver processens dynamik inom arbetsområdet.

Som dimensionerings kriterium vid beräkning av regulatorparametrarna kan tex någon variant av nedan uppräknade kriterier användas :

- polplacering av slutna systemet för önskad snabbhet och

dämpning.

- minimering av någon förlustfunktion.
- minimering av utsignalens varians.

### 3.2 Drifttillståndet

Processens dynamiska egenskaper beror på drifttillståndet (arbetspunkten). I vissa fall är förändringarna av drifttillståndet direkt mätbara, nämligen då man har tillgång till processens samtliga tillstånd, in- och utsignaler via direkta mätningar. Om så inte är fallet måste någon form av skattning och rekonstruktion av de icke-mätbara tillstånden eller signalerna göras för att arbetspunkten med tillhörande drifttillstånd skall kunna beräknas.

### 3.3 Parameterberäkningen

Parameterberäkningen har till uppgift att beräkna regulatorparametrarna. Den kan i sin enklaste form utgöras av en tabell med förhandsberäknade regulatorparametrar som funktion av processens drifttillstånd. Nya parametrar beräknas då via "tabell-uppslagning" och interpolation mellan närliggande värden.

Ibland kan man istället få fram kontinuerliga funktioner som explicit anger hur regulatorparametrarna skall väljas för uppfyllelse av dimensionerings kriteriet.

Regulatorn vars parametrar skall vara varierbara, kan vara av godtycklig struktur tex PI(D), polynomregulator etc.

### 3.4 Svårigheter och nackdelar med parameterstyrningen.

Beräkningen av regulatorparametrarna sker i öppen styrning dvs återkoppling för kompensation av beräknade felaktiga regulatorparametrar saknas. Detta kan medföra stabilitetsproblem.

Det kan vara svårt att få fram en tillräckligt bra modell av processens dynamik som man kan utgå ifrån vid regulatorkonstruktionen.

Designen av den parameterstyrda regulatorn är tidskrävande och kräver oftast omfattande arbete.

Beräkningen av regulator parametrarna i "real" tid kan kräva mycket "datorkraft" vid praktisk användning av regulatorn.

Andra avgöranden är tex hur ofta beräkning av nya regulatorparametrar skall ske. Denna tiden måste relateras till processens tidskonstanter och snabbhet.

## 4 Parameterstyrd regulator för vattenkraftsstationen.

### 4.1 Företsättningar.

Normalt är ett vattenkraftverk anslutet till ett belastande nät tillsammans med ett flertal andra kraftproducerande stationer. Att styra de kraftproducerande enheterna så att balans mellan producerad och förbrukad effekt uppnås, betraktas här som ett globalt överordnat fördelningsproblem. Målsättningen för detta arbete har istället varit att - för en given vattenkrafts station, sträva efter bästa möjliga frekvensreglering, oberoende av arbetspunkt och producerad energi. Dock kan man inte komma ifrån att effekt och frekvens i ett system intimt hänger ihop enligt :

effekt-överskott medför frekvensökning  
effekt-underskott medför frekvensminskning

Regulatorn skall pga internationella normer för vattenkraftsreglering ha en PID-struktur.

Som dimensionerings-kriterium för beräkning av regulatorparametrarna har valts placering av slutna systemets dominanta poler.

Vattenflödet Q1 som utgör ett av drifttillstånden är inte direkt mätbart utan måste skattas via en observerare.

Genom att åstadkomma en linjär modell som i varje arbetspunkt väl beskriver det olinjära systemets dynamik, kan regulator parametrar beräknas för önskad placering av slutna linjära systemets dominerande poler. Då den linjära modellen är en bra approximation låter man helt enkelt dessa regulatorparametrar styra ut det olinjära systemet. Detta innebär att en linjärisering av processens olinjära delar delar måste genomföras.

### 4.2 Linjärisering

Olinjäriteter i simuleringssmodellen återfinnes i de båda simuleringens blocken WTURB och GRID (om man bortser från ställdons begränsningarna).

För att åstadkomma en approximativt linjär modell har WTURB och GRID kopplats samman och den sammankopplade modellen har sedan linjäriserats (se fig 4.2.1).

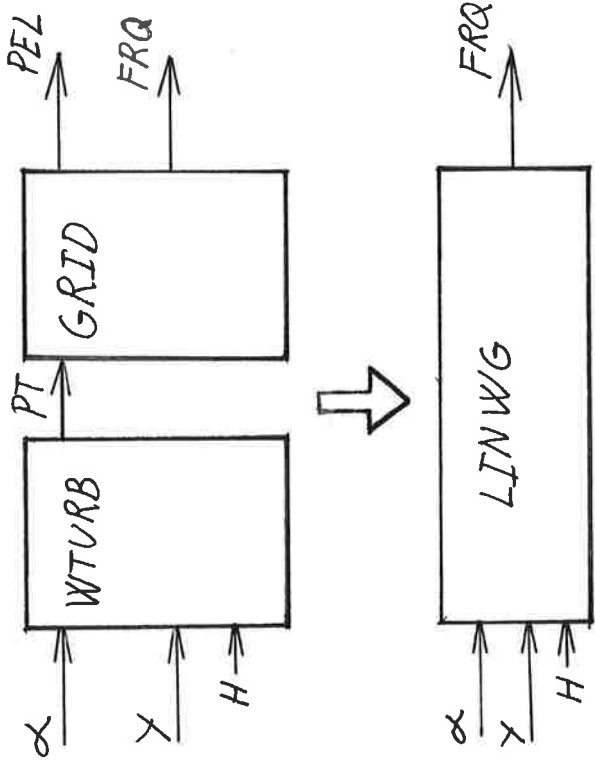


Fig 4.2.1

En linjär modell av turbinen, vattenvägarna och generatoren åstadkommes mha Taylor utveckling och trunkering, av de olinjära processfunktionerna. Linjäriseringen göres map flödet  $Q1$ , frekvensen  $frq$ , pådraget  $Y$  och kaplan-vinkeln  $\alpha$ . Den olinjära modellen beskrives av differentialekvationerna :

$$\frac{dQ1}{dt} = f(Q1, frq, Y, \alpha) \quad (4.2.1)$$

$$\frac{dfrq}{dt} = g(Q1, frq, Y, \alpha) \quad (4.2.2)$$

där  $f$  och  $g$  är olinjära funktioner map  $Q1$ ,  $frq$ ,  $Y$  och  $\alpha$ .

En arbetspunkt  $WP = \{Q1^0, frq^0, Y^0, \alpha^0\}$  sådan att  $f(Q1^0, frq^0, Y^0, \alpha^0) = 0$  införes.

Vidare införes avvikelse från arbetspunkten enl :

$$\begin{aligned}
 \Delta Q1 &= Q1 - Q1^0 \\
 \Delta frq &= frq - frq^0 \\
 \Delta Y &= Y - Y^0 \\
 \Delta \alpha &= \alpha - \alpha^0
 \end{aligned}
 \tag{4.2.4}$$

Taylor utveckling och trunkering av f och g kring arbetspunkten WP ger :

$$\frac{d\Delta Q1}{dt} = \frac{\partial f}{\partial Q1} \cdot \Delta Q1 + \frac{\partial f}{\partial frq} \cdot \Delta frq + \frac{\partial f}{\partial Y} \cdot \Delta Y + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha
 \tag{4.2.5}$$

$$\frac{d\Delta frq}{dt} = \frac{\partial g}{\partial Q1} \cdot \Delta Q1 + \frac{\partial g}{\partial frq} \cdot \Delta frq + \frac{\partial g}{\partial Y} \cdot \Delta Y + \frac{\partial g}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha
 \tag{4.2.6}$$

med arbetspunkten WP insatt i de partiella derivatorna ovan.

Om istället de arbetspunktsberoende variablerna :

$\Psi = \{ \Psi1, \Psi2, \dots \}$  införes kan ekvationerna ovan skrivas som :

$$\frac{d\Delta Q1}{dt} = \Psi1 \cdot \Delta Q1 + \Psi2 \cdot \Delta frq + \Psi3 \cdot \Delta Y + \Psi4 \cdot \Delta \alpha
 \tag{4.2.7}$$

$$\frac{d\Delta frq}{dt} = \Psi5 \cdot \Delta Q1 + \Psi6 \cdot \Delta frq + \Psi7 \cdot \Delta Y + \Psi8 \cdot \Delta \alpha
 \tag{4.2.8}$$

Efter Laplace transformering fås :

$$FRQ = \frac{(a1 + b1 \cdot s) \cdot Y + (a2 + b2 \cdot s) \cdot \alpha}{s^2 + d1 \cdot s + d0}
 \tag{4.2.9}$$

En fullständig linjärisering finns i appendix 1.

Sammanfattningsvis har man nu, ur de båda olinjära WTURB och GRID åstadkommit en linjär approximativ modell LINWG, giltig i en lokal omgivning kring arbetspunkten WP.

Simulerings jämförelser visar att LINWG, för arbetspunkter över hela arbetsområdet, är en bra approximation av WTURB+GRID. Fig 4.2.2 visar en jämförelse mellan olinjära respektive linjära modellen för ett litet steg i y och  $\alpha$  vid arbetspunkten motsvarande Pref=0.5.

1 = olinjära modellen  
2 = linjära modellen

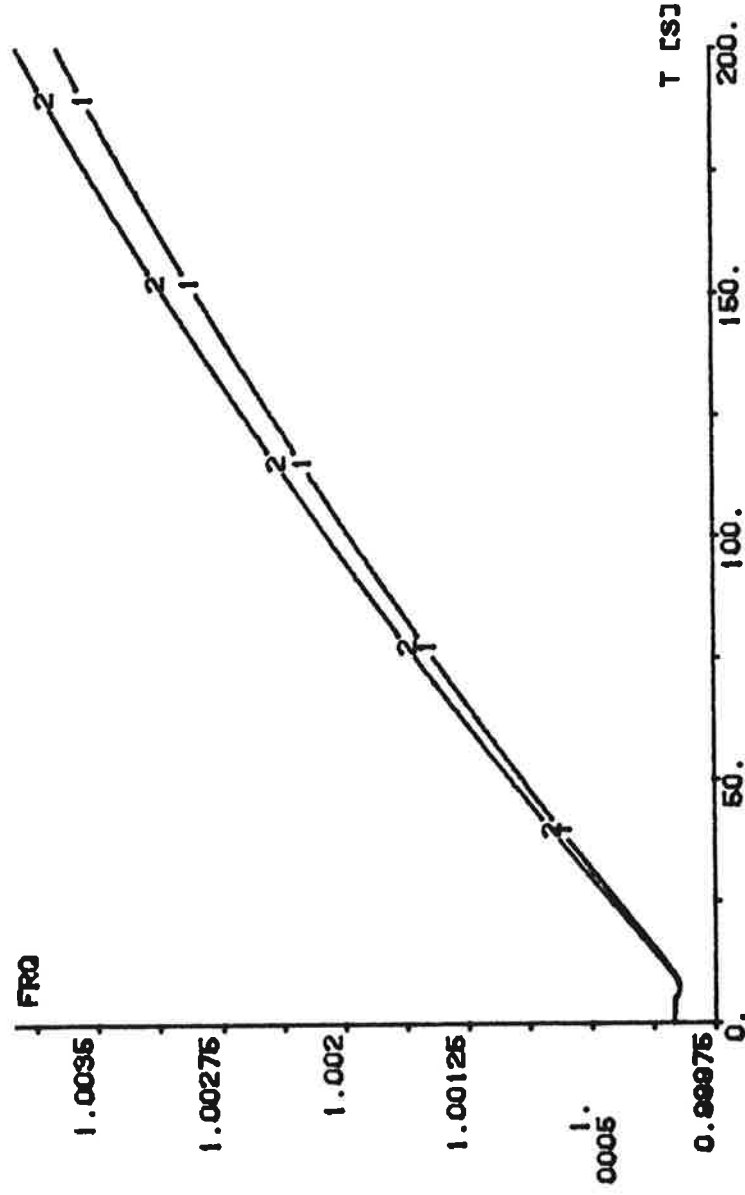


Fig 4.2.2

Jämförelse mellan linjära och olinjära modellen i en arbetspunkt.

### 4.3 Observeraren

Observerarens uppgift är att bestämma det olinjära systemets arbetspunkt  $WP = \{Q1^0, frq^0, Y^0, \alpha^0\}$ .

Då de mätbara signalerna endast utgöres av pådraget  $Y$ , kaplanvinkeln  $\alpha$  samt frekvensen  $frq$  och elektriska effekter PEL måste observeraren konstrueras för s.k. "död-räkning" utan korrektion mot något verkligt tillstånd eller utsignal. Detta har gjorts genom att utnyttja en modell för processen. Modellen och utsignalen har därigenom använts för att "baklänges" beräkna flödet  $Q1$ .

Dessutom bör man undvika att använda PEL eftersom som också vill kunna styra kraftverket utan att det är insynkroniserat på nätet, dvs då  $PEL=0$  (jämför med lastfrånslag då bortkoppling från nätet sker).

För dynamiken i observeraren fås :

$$\frac{d\hat{Q}1}{dt} = k \cdot (f(y, \alpha, frq) - \hat{Q}1) \quad (4.3.1)$$

Vid implementeringen har dessutom lågpasfilter för bortfiltrering av högfrekvent mätbrus från insignalerna, införts.

En fullständig redovisning av observeraren finns i appendix 2.

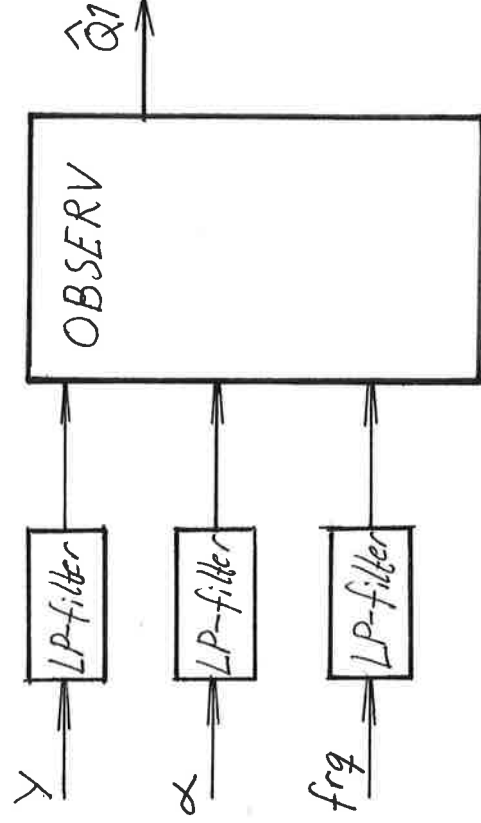


Fig 4.3.1  
Observerare med filter

Fig 4.3.2 visar en simuleringsjämförelse mellan observerarens skattning och det verkliga värdet på  $Q1$ , vid ett steg i referensvärdet Pref.

Gränsvinkelfrekvenser för lågpasfilterna enl :

Y : 1  
 $\alpha$  : 0.5  
 frq : 0.5

Dessa gränsvinkelfrekvenser har sedan använts vid samtliga här presenterade simulerings-resultat.

1 =  $\hat{Q}1$   
 2 =  $\hat{Q}1$

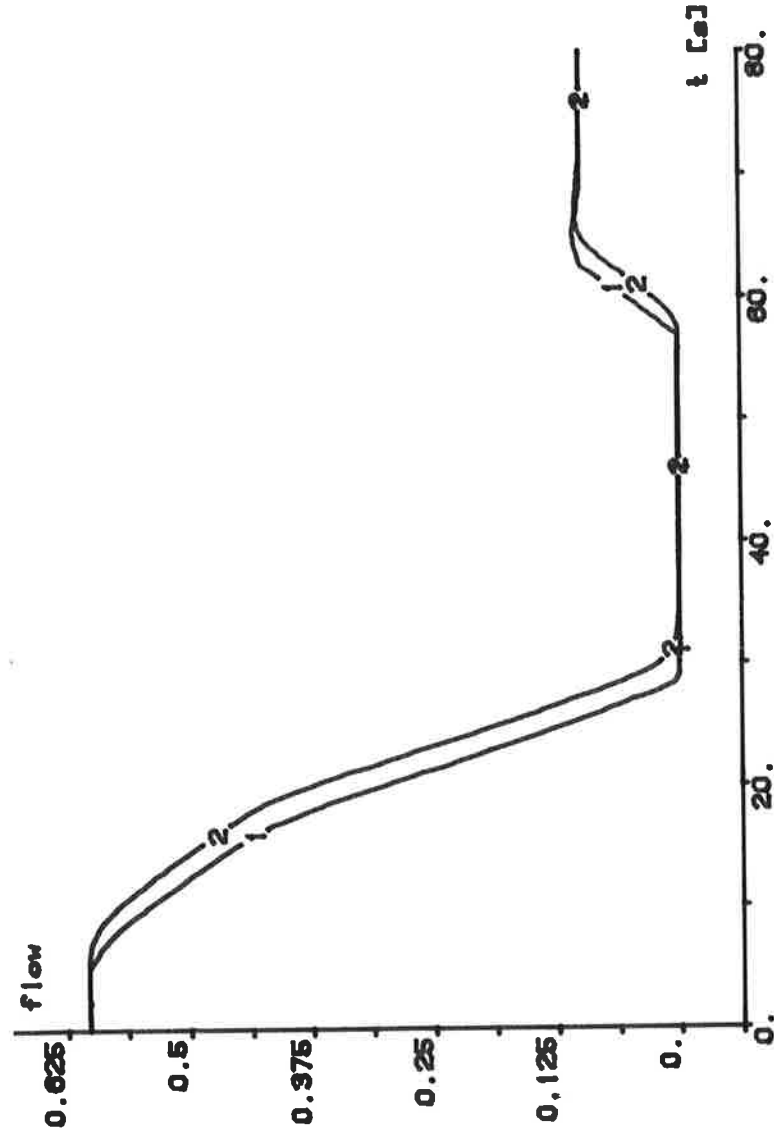


Fig 4.3.2

Jämförelse mellan estimerat och verkligt flöde.



#### 4.4 Polplacering

Dimensioneringskriteriet för beräkningen av regulatorns parametrar utgörs av placering av slutna systemets dominerande poler så att önskvärd snabbhet och dämpning uppnås.

Denna polplacering görs på det linjäriserade förenklade systemet :

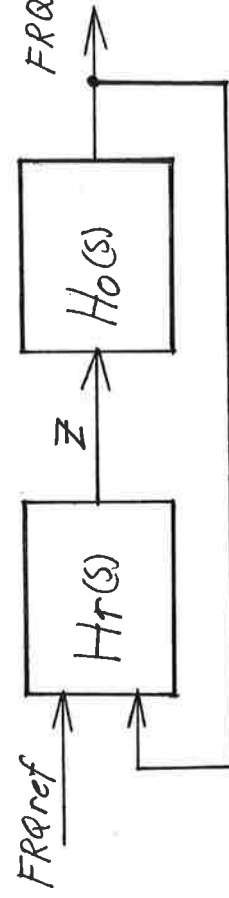


Fig 4.4.1

$H_r(s)$  - regulatorn (PID)

$H_o(s)$  - linjära förenklade öppna systemet

dvs det öppna sammankopplade systemet :  $H_s(s) = H_r(s) \cdot H_o(s)$

Det linjära öppna systemet  $H_o(s)$  innehåller LINWG - den linjäriserade modellen för vattenvägar, turbin och generator, samt modellerna för ställdon och kam.

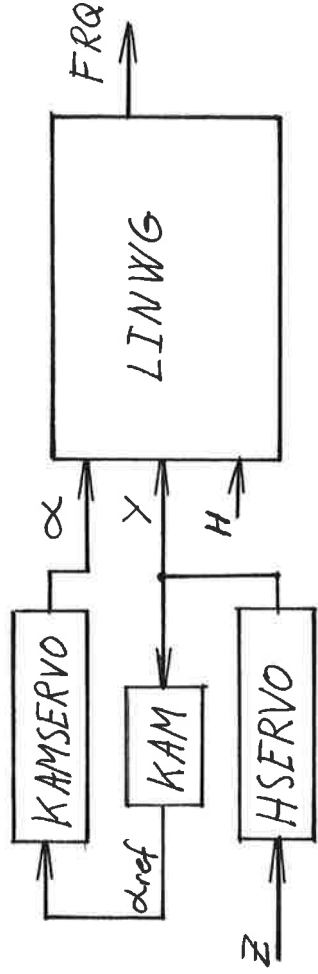


Fig 4.4.2

$H_o(s)$  - den linjära processmodellen

$$\text{Pådragsservo : } H_h(s) = \frac{A_{1h}}{A_{2h} \cdot s + 1}$$

$$\text{Kamservo : } H_k(s) = \frac{A_{1k}}{A_{2k} \cdot s + 1}$$

Kam :  $H_k$

$$\text{LINWVG : } FRQ = \frac{(a_1 + b_1 \cdot s) \cdot y + (a_2 + b_2 \cdot s) \cdot \alpha}{s^2 + d_1 \cdot s + d_0}$$

Insättning ger :

$$H_o(s) = \frac{FRQ}{Z} = \frac{((b_1 + a_1 \cdot s)(A_{2k} \cdot s + 1) + (b_2 + a_2 \cdot s)H_k)A_{1k}}{(s^2 + d_1 \cdot s + d_0)(A_{2k} \cdot s + 1)(A_{2h} \cdot s + 1)} \quad (4.4.1)$$

$H_r(s)$  är överföringsfunktionen för PID-regulatorn :

$$Z = K_r \cdot \left[ \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \cdot (FRQ_{ref} - FRQ) - T_d \cdot s \cdot FRQ \right] \quad (4.4.2)$$

där  $FRQ_{ref}$  är referensvärdet.

För att beräkningen av regulator parametrarna användes en ny metod (se Hägglund, Aström, (1984)) som grundar sig på en beräkning av öppna systemets Nyquist-kurva för två närliggande frekvenser:  $\omega_1$  och  $\omega_2$ .

Framställningen nedan återger direkt resultat från ovan refererade rapport.

Metoden utnyttjar att avbildningen från komplexa talplanet till "Nyquist-planet" är konform, dvs vinkelriktig.

$Hs(i\omega)$ -planet

S-planet

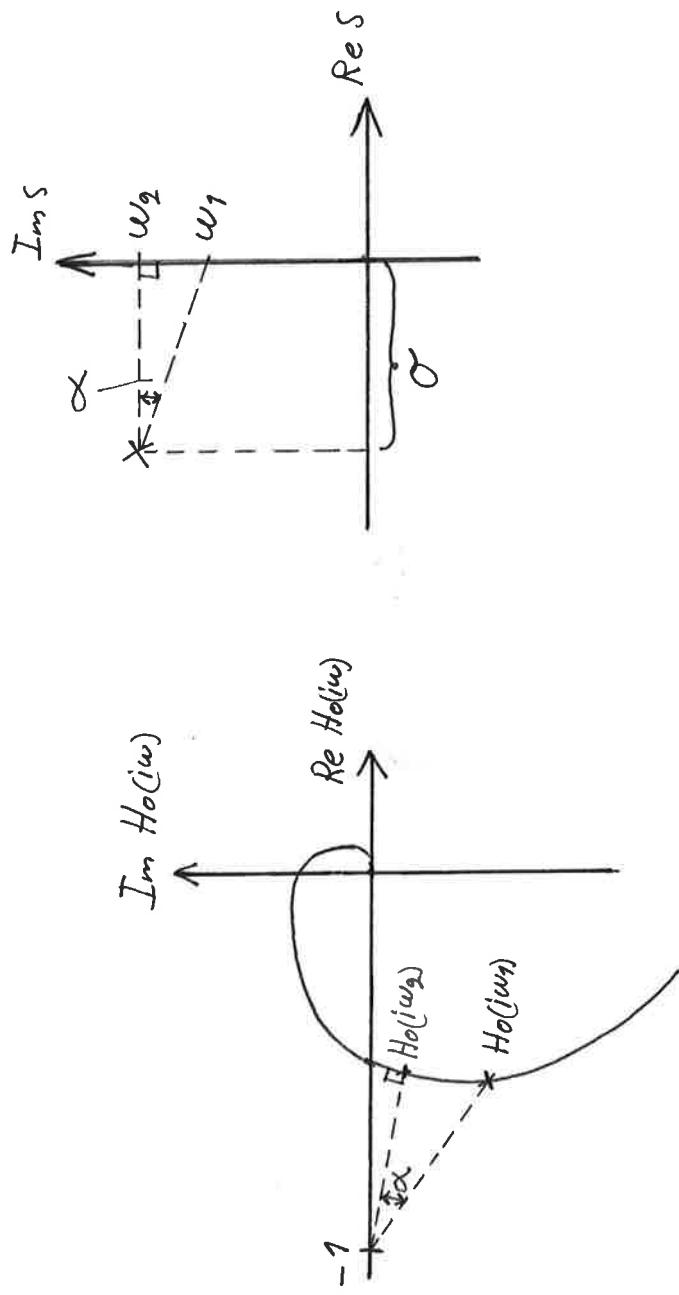


Fig 4.4.3

De båda trianglarna är likformiga då avbildningen är konform

För att erhålla dominerande poler med frekvensen  $\omega_2$  så skall normalen för sammankopplade systemets Nyquist-kurva ( $Hs(i\omega)$ ) för  $\omega=\omega_2$  gå genom punkten -1. (se fig 4.4.3)

Likformiga trianglar ger :

$$\frac{Hs(i\omega_2) - Hs(i\omega_1)}{i\omega_2 - i\omega_1} = \frac{Hs(i\omega_2) + 1}{\sigma} \quad (4.4.3)$$

$$\text{med } \sigma = \frac{\zeta \cdot \omega_2}{\sqrt{1 - \zeta^2}}$$

där  $\zeta$  är den specifika dämpningen

Ekvation (4.4.3) kan nu skrivas om som :

$$\frac{Hs(i\omega_2) - Hs(i\omega_1)}{Hs(i\omega_2) + 1} = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \cdot \frac{i(\omega_2 - \omega_1)}{\omega_2} = i \cdot k \quad (4.4.4)$$

Låt nu

$$Ho(i\omega_1) = av1 + i \cdot bv1 \quad (4.4.5)$$

$$Ho(i\omega_2) = av2 + i \cdot bv2 \quad (4.4.6)$$

och för det sammankopplade systemet  $Hs(i\omega)$  :

$$Hs(i\omega_1) = Hr(i\omega_1) \cdot Ho(i\omega_1) = c1 + i \cdot d1 \quad (4.4.7)$$

$$Hs(i\omega_2) = Hr(i\omega_2) \cdot Ho(i\omega_2) = c2 + i \cdot d2 \quad (4.4.8)$$

Genom att kombinera (4.4.4), (4.4.7) och (4.4.8) kan man nu skriva :

$$\frac{c2 - c1 + i(d2 - d1)}{c2 + 1 + i \cdot d2} = i \cdot k \quad (4.4.9)$$

med lösningen :

$$c2 - c1 + \kappa \cdot d2 = 0 \quad (4.4.10)$$

$$d2 - d1 - \kappa(c2 + 1) = 0 \quad (4.4.11)$$

Ur ekvationerna (4.4.10) och (4.4.11) kan nu den ansatta PID regulatorns parametrar lösas ut under förutsättning att  $Td = \alpha \cdot Ti$  där  $\alpha$  är en konstant.

Sätt  $Td = \alpha \cdot Ti$

Detta innebär att (4.4.7) och (4.4.8) kan skrivas :

$$Hs(i\omega_1) = Kr \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot i\omega_1} + \alpha \cdot T_i \cdot i\omega_1 \right) (av_1 + ibv_1) = c_1 + id_1 \quad (4.4.12)$$

$$Hs(i\omega_2) = Kr \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot i\omega_2} + \alpha \cdot T_i \cdot i\omega_2 \right) (av_2 + ibv_2) = c_2 + id_2 \quad (4.4.13)$$

Identifiering ger att :

$$c_1 = Kr(av_1 + \frac{bv_1}{T_i \cdot \omega_1} - bv_1 \cdot \omega_1 \cdot \alpha \cdot T_i) \quad (4.4.14)$$

$$d_1 = Kr(av_1 \cdot \omega_1 \cdot \alpha \cdot T_i - \frac{av_1}{\omega_1 \cdot T_i} + bv_1) \quad (4.4.15)$$

$$c_2 = Kr(av_2 + \frac{bv_2}{T_i \cdot \omega_2} - bv_2 \cdot \omega_2 \cdot \alpha \cdot T_i) \quad (4.4.16)$$

$$d_2 = Kr(av_2 \cdot \omega_2 \cdot \alpha \cdot T_i - \frac{av_2}{\omega_2 \cdot T_i} + bv_2) \quad (4.4.17)$$

Genom att sätta in (4.4.14) till (4.4.17) i ekvationerna (4.4.10) och (4.4.11) kan sedan  $T_i$  enkelt lösas ut ur (4.4.10) som en andragradsekvation (positiva roten användes) och därefter  $Kr$  ur (4.4.11).

De önskade dominerande polerna hos slutna systemet anges i form av dess frekvens  $\omega_2$  och relativa dämpningen  $\zeta$ .

Sammanfattningsvis så har nu kontinuerliga ekvationer tagits fram som anger hur regulatorparametrarna skall variera med dynamiken hos den linjära modellen för att dimensioneringskriteriet skall uppfyllas.

## 5. Simuleringar med parameterstyrda regulatorn

### 5.1 Implementeringen av regulatorn

Regulatorn implementerades i SIMNON för att möjliggöra simuleringsjämförelser mellan den parameterstyrda regulatorn och motsvarande regulator med fasta parametrar.

Implementeringen har delats upp i fyra olika delblock (fig. 5.1.1.)

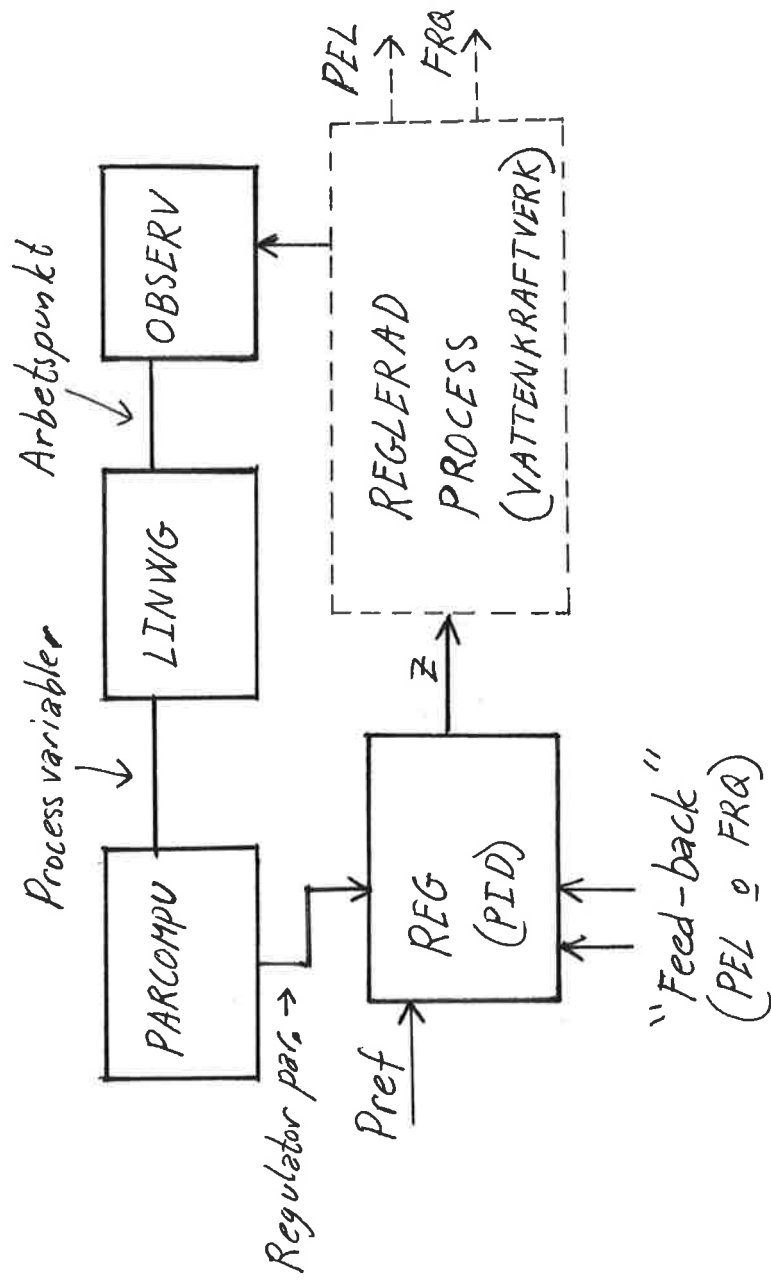


Fig. 5.1.1  
Parameterstyrda regulatorn.

REG : är en ordinär PID-regulator med två ingångar och en utgång, vars regulatorparametrar utifrån, kontinuerligt kan förändras.

**PARCOMPU :** beräknar först det öppna förenklade linjära systemets Nyqvist-kurva för två närliggande frekvenser. Därefter beräknas erfoderliga regulatorparametrar för placeringen av slutna linjära systemets dominerande poler enl dimensioneringskriteriet.

**LINWG :** innehåller den linjäriserade modellen av vattenvägarna, turbin och generator och beräknar dess processvariabler som funktion av arbetspunkten WP.

**OBSERV :** innehåller observeraren med brusreducerande lågpasfilter. Observeraren beräknar arbetspunkten WP från de uppmätta signalerna.

Den parameterstyrda regulatorn är implementerad som ett tidskontinuerligt system men då all "dynamik" är samlad i OBSERV är det enkelt att åstadkomma en tidsdiskret variant.

Den tidskontinuerliga implementeringen innebär att nya regulator parametrar kontinuerligt beräknas och direkt uppdaterar parametrarna i REG.

## 5.2 Resultat

Ett antal jämförande simuleringar med fasta regulator-parametrar respektive den parameterstyrda regulatorn PARREG, har genomförts.

Alla simuleringsresultat visas i "per unit" utom tiden vilken motsvarar verklig tid i sekunder. Simuleringar har utförts vid tre olika arbetspunkter :

WP02 : Pref = 0.2  
 WP05 : Pref = 0.5  
 WP07 : Pref = 0.7

Nedan återgivna resultat är resultat av simuleringar med samma fasta parametrar för båda systemen vid WP05, utan att någon optimering av den parameterstyrda regulatorn, har gjorts. Försök har visat att prestanda för det parameterstyrda systemet, avsevärt kan förbättras om en optimering göres.

Den fasta regulatorns parametrar överensstämmer med de som använts av ASEA vid tidigare gjorda simuleringar. Dessa regulator parametrar är valda för att bibehålla stabiliteten inom hela arbetsområdet.

### 1. Lastfrånslag på simulerad generator

Innebär att belastningen vid  $t=5$ , helt försvinner för den simulerade kraftstationen. Detta medför energi-överskott i simulerad generator och frekvensen stiger.

Nr 1 - fasta regulator parametrar.

Nr 2 - parameterstyrd regulator.

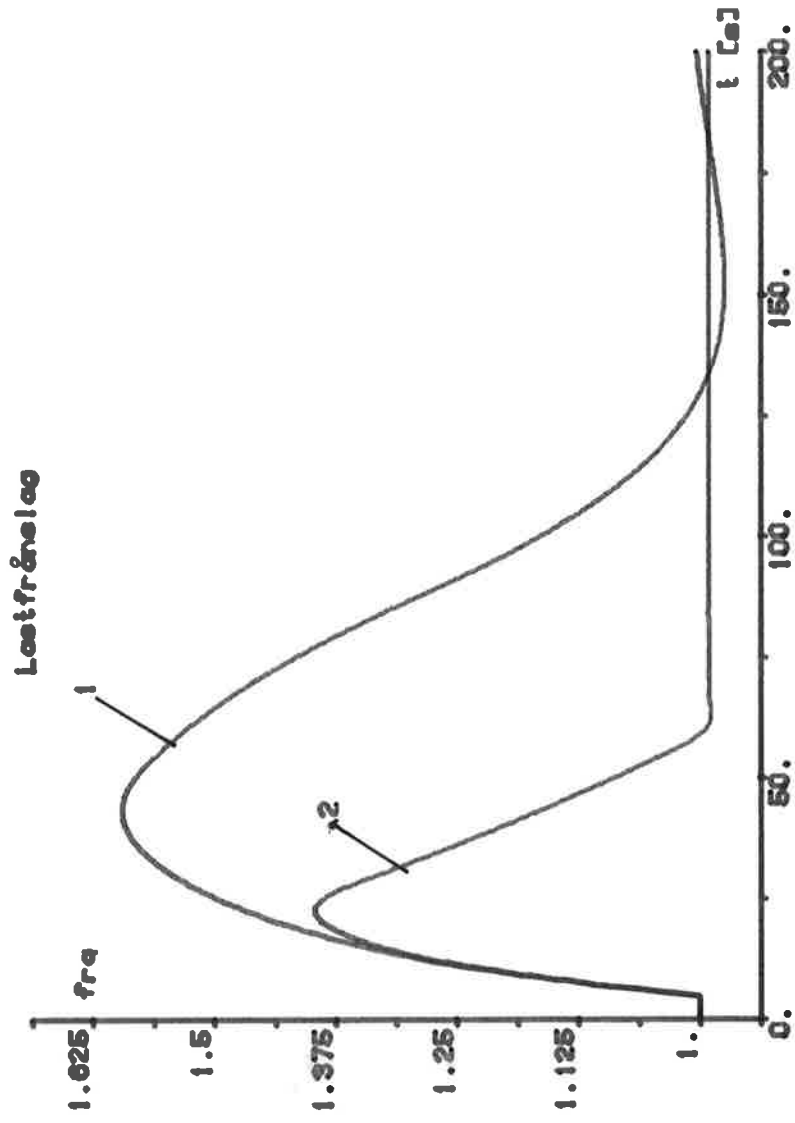


Fig 5.2.1  
Lastfrånslag

kommentarer

Den parameterstyrda regulatorn PARREG möjliggör en avsevärt snabbare nedreglering av överfrekvensen då lastfrånslaget sker. Hastighets begränsningarna i HSERVO utgör den begränsande faktorn för att kunna åstadkomma en ännu snabbare nedreglering.



## 2. Bortfall av generator

Innebär att lastfrånslag göres på en annan till nätet insynkroniserad generator. Detta medför att de återstående generatorerna måste kompensera den bortfallna effekten genom att öka sin effektproduktion.

Nedan visas simuleringar för arbetspunkterna WP05 och WP07.

Nr 1 - fasta regulatorparametrar.

Nr 2 - parameterstyrd regulator.

WP05

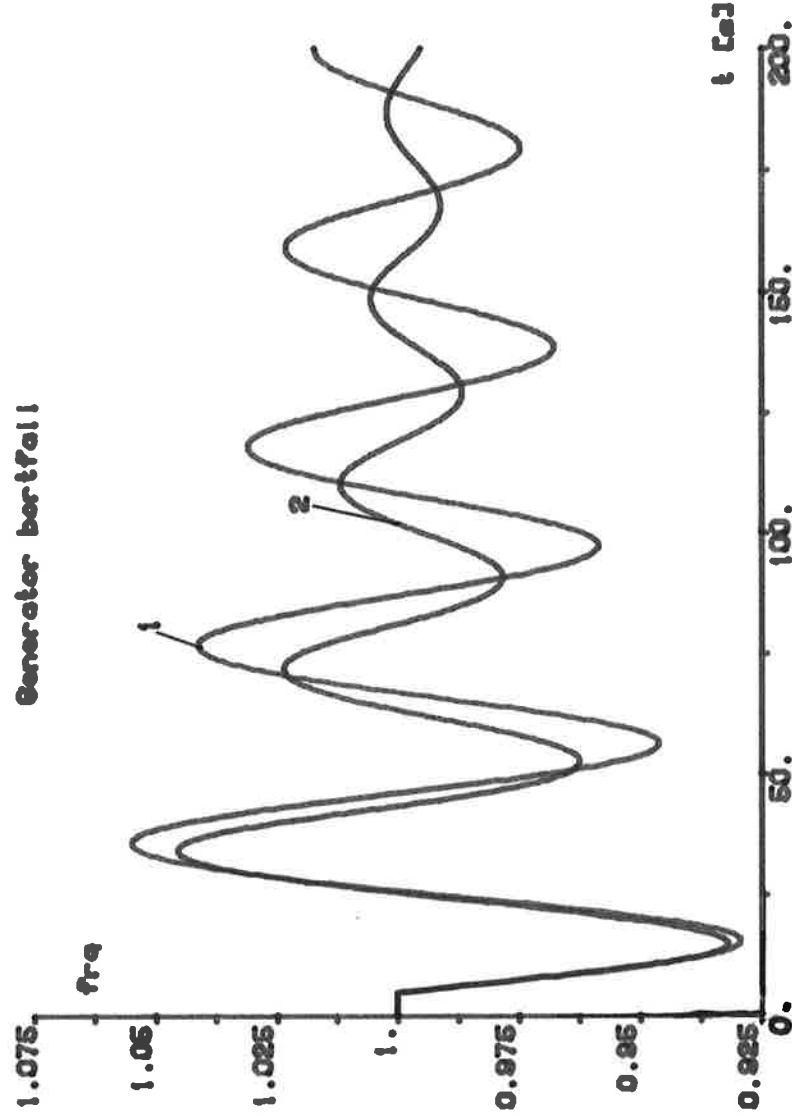


Fig 5.2.2  
Generatorbortfall. Arbetspunkt WP05.

kommentarer

Detta är en svår störning att kompensera. Det parameterstyrda systemet medför dock en klar förbättring.

## WP07

För att bättre direkt kunna jämföra resultaten mellan de båda regulatorerna så har vid nedanstående simulering den fasta regulatorn samma regulator parametrar som det parameterstyrda systemet antar vid WP02. Fig 5.2.4 visar hur regulatorparametrarna varierar vid bortfall av en generator. Dessutom har de fasta regulatorparametrarna lagts in i figuren som rätta linjer.

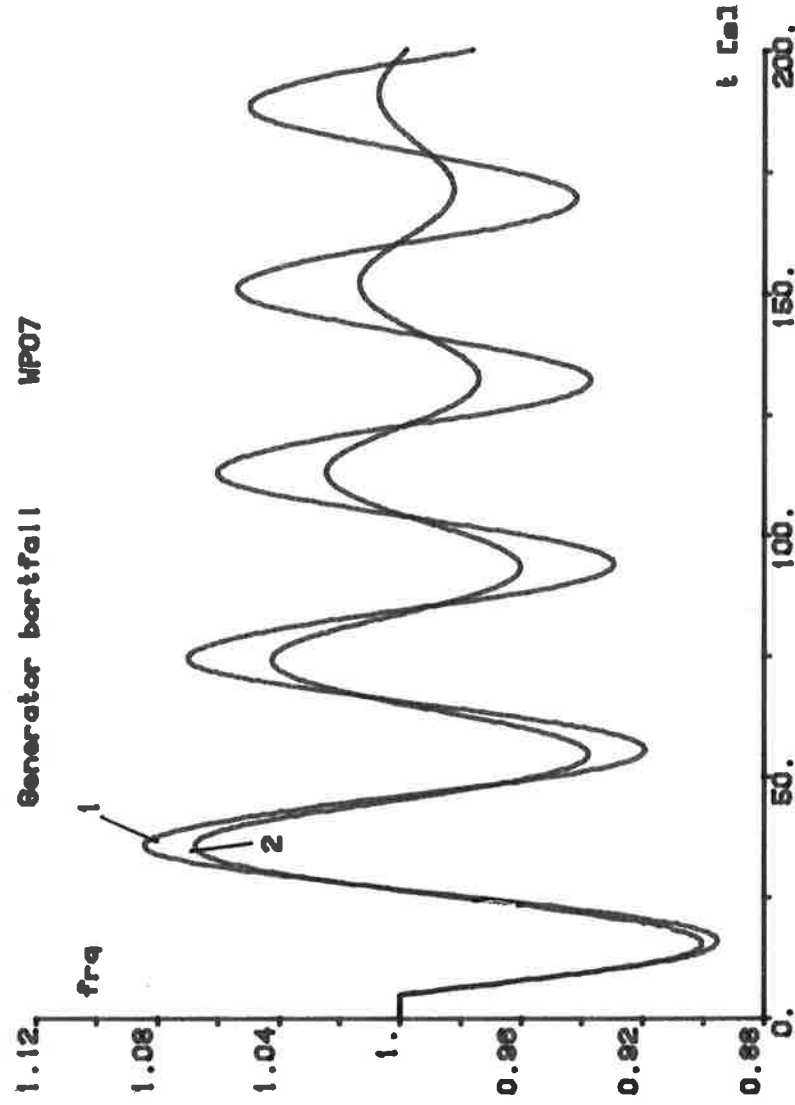


Fig 5.2.3  
Generatorbortfall. Arbetspunkt WP07.

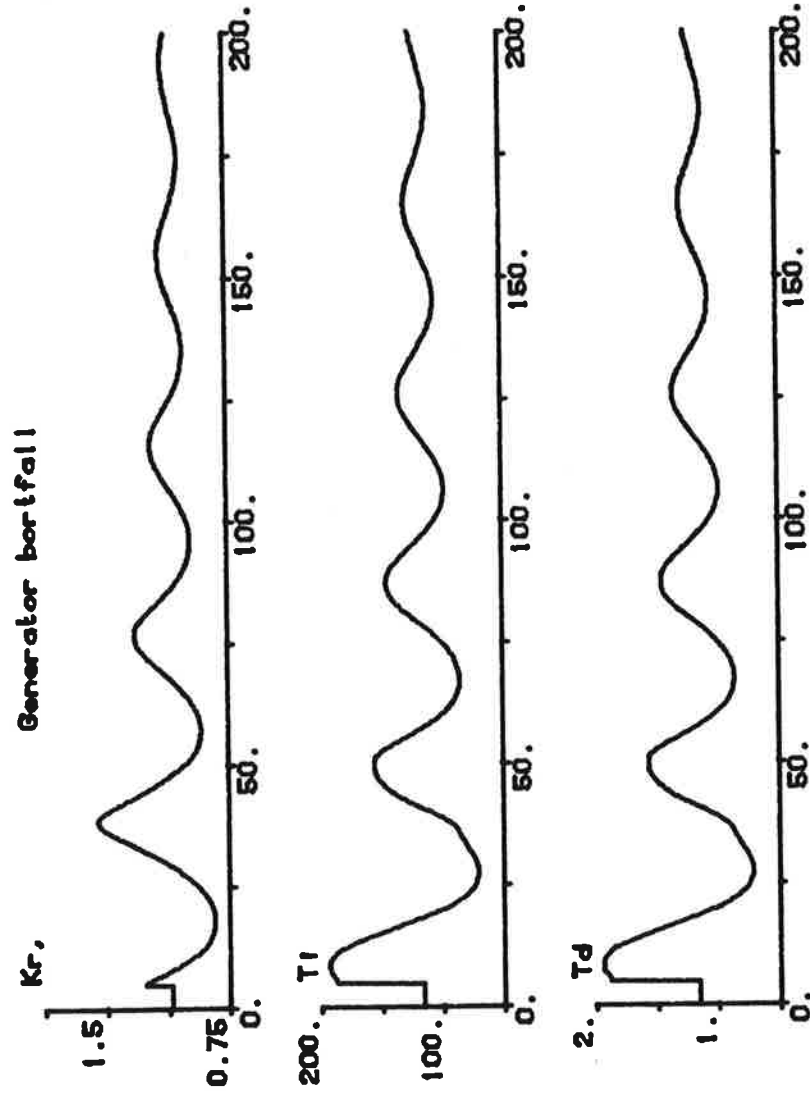


Fig 5.2.4

Variationerna i parameterstyrda regulatorns parametrar.

kommentarer

Resultaten visar klart hur den parameterstyrda regulatorn är överlägsen genom att förändra sina parametrar vid byte av arbetspunkt. Försök visar även att man bör begränsa regulatorparametrarnas snabba variationer då man reglerar ett kraftverk med stor vatten-anloppstid.

### 3. Laststörning

Innebär belastningen plötsligt (vid  $t=5$ ) ökar beroende på tex. inkoppling av tex en större industrianläggning.

Nr 1 - fasta regulator parametrar

Nr 2 - parameterstyrd regulator

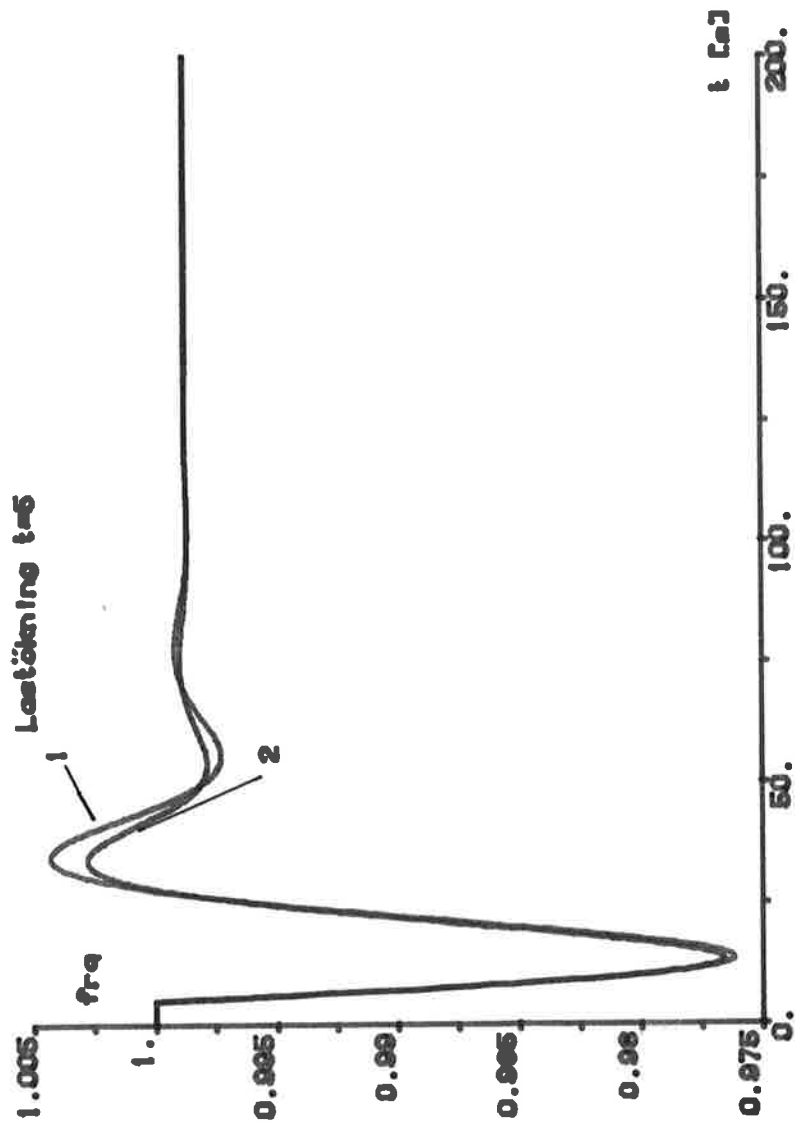


Fig 5.2.5  
Laststörning.

Även här är parameterstyrda regulatorn klart bättre.  
kommentarer

## 6 Sammanfattning

Målet med detta examensarbete har varit att bygga in kunskap om den reglerade processen i en regulator.

För att nå fram till detta valdes att konstruera en parameterstyrd regulator som innehåller en linjär modell av den reglerade olinjära processen. Denna modellens dynamik förändras med den olinjära processens arbetspunkt.

Denna regulator har sedan tillämpats för frekvensreglering av en vattenkraft station. En process som är olinjär med icke-min fas karakter.är.

Arbetet har utgått från fullständiga simuleringssmodeller i form av blockscheman över ett vattenkraftverk.

Kontinuerliga ekvationer har tagits fram som anger hur regulator parametrarna skall variera med förändringar i processens arbetspunkt för att dimensioneringskriteriet - placering av slutna systemets dominerande poler - skall uppfyllas.

De önskade dominerande polerna specificeras med sin frekvens  $\omega_2$  och specifika dämpning  $\zeta$ .

Jämförande simuleringar mellan ett system med fasta regulator parametrar och den parameterstyrda regulatorn visar på en avsevärt förbättrad frekvensreglering för olika former av störningar över hela arbetsområdet.

Vid kraftiga störningar uppvisar den parameterstyrda regulatorns parametrar relativt kraftiga snabba variationer. Dessa variationer bör begränsas då kraftverk med stor anloppstid skall regleras eftersom verkan av variationerna i sådana fall blir tidsfördröjda och når processen med fasfel.

Traditionella regulatorer måste dimensioneras konservativt för att stabiliteten skall säkerställas inom hela arbetsområdet. Den parameterstyrda regulatorn förändrar sina regulatorparametrar med arbetspunkten och är alltid "lagom stark".

## 7 Litteraturreferenser

- Aström, K. J. (1976) : "Reglerteori", Almqvist & Wiksells förlag, Uppsala.
- Aström, K. J. och B. Wittenmark (1984) : "Computer Controlled Systems", Prentice Hall Inc.
- Aström K. J. (1982) : "A SIMNON Tutorial", Inst. för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola.
- Goldwag, E. (1971) : "On the Influence of Water Turbin", Journal of Basic Engineering, dec 1971.
- Hägglund, T. och K. J. Aström (1984) : "A new method for design of PID-regulators", Inst. för Reglerteknik, Lunds Tekniska Högskola.



## APPENDIX 1

## Linjärisering av WTURB och GRID

De båda modellerna för vattenvägarna turbinen och generatorm kopplas samman för att åstadkomma en linjär modell.

Utgår från ekvationerna :

$$\frac{dQ1}{dt} = 5 \left[ f1(y, \alpha) \cdot \sqrt{H-T1} \cdot \frac{dQ1}{dt} + (frq-1) \cdot A5 \cdot y - Q1 \right] \quad (1)$$

$$\frac{dfrq}{dt} = \frac{1}{Tg} \cdot \left[ A2 - (A1+A2) \cdot frq + \frac{PT-PEL}{frq} \right] \quad (2)$$

med

$$PT = \text{eff} \left[ (H-T1) \cdot \frac{dQ1}{dt} \right] \cdot Q - A6 \cdot (frq-1) \cdot frq \quad (3)$$

där

PT är mekaniska turbineffekten

PEL är elektriska effekten

f1(y,α) är en funktion av y och α

eff är en funktion av α

Q är en funktion av f1, y, dQ1/dt och frq

Tg är generatorms dynamiska tidskonstant.

T1 är vattnets anloppstid.

Ekvationerna ovan skrives om som :

$$\frac{dQ1}{dt} = a1 \left[ f1 \cdot \sqrt{1-a2} \cdot \frac{dQ1}{dt} + a3 \cdot (frq-1) \cdot y - a4 \cdot Q1 \right] \quad (4)$$

$$\frac{dfrq}{dt} = a5 \left[ a6 - a7 \cdot frq - \frac{PEL}{frq} + \frac{a8}{frq} \cdot \text{eff} \left( (1 - a2) \frac{dQ1}{dt} \right) \cdot Q - a9 \cdot (frq-1) \cdot frq \right] \quad (5)$$



Genom att flytta över så att  $dQ1/dt$  endast finns i högra leden

i (3) och (4) erhålles :

$$0 = a1 \left[ \dots \dots \dots \right] - \frac{dQ1}{dt} = f(y, \alpha, Q1, \frac{dQ1}{dt}) \quad (6)$$

$$\frac{dfrq}{dt} = a5 \left[ \dots \dots \dots \right] = g(y, \alpha, Q1, \frac{dQ1}{dt}) \quad (7)$$

Ekvationerna f och g skall nu linjäriseras kring arbetspunkten WP

$$WP = (Q1^o, frq^o, y^o, \alpha^o) \quad \text{med} \quad \dot{Q1}^o = \frac{dQ1}{dt} = 0$$

Avvikelseerna kring arbetspunkten införes enligt :

$$\begin{aligned} \Delta \dot{Q1} &= \dot{Q1} - \dot{Q1}^o = \dot{Q1} \\ \Delta Q1 &= Q1 - Q1^o \\ \Delta frq &= frq - frq^o \\ \Delta y &= y - y^o \\ \Delta \alpha &= \alpha - \alpha^o \end{aligned} \quad (8)$$

Detta ger de linjära ekvationerna :

$$0 = \frac{\partial f}{\partial Q1} \cdot \Delta \dot{Q1} + \frac{\partial f}{\partial Q1} \cdot \Delta Q1 + \frac{\partial f}{\partial frq} \cdot \Delta frq + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \Delta y + \frac{\partial f}{\partial \alpha} \cdot \Delta \alpha \quad (9)$$

och på motsvarande sätt för g

$$\frac{d\Delta frq}{dt} = \frac{\partial g}{\partial \dot{Q1}} \cdot \Delta \dot{Q1} + \dots \dots \dots \quad (10)$$

med arbetspunkten WP insatt i ovanstående partiella derivator.

Detta medför :

$$\frac{\partial f}{\partial y} = a1 \left[ \frac{\partial f1}{\partial y} \cdot \sqrt{1-a2 \cdot \dot{Q}1} + a3 \cdot (frq-1) \right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = a1 \left[ \frac{\partial f1}{\partial \alpha} \cdot \sqrt{1-a2 \cdot \dot{Q}1} \right] \quad (12)$$

$$\frac{\partial f}{\partial Q1} = -a1 \cdot a4 \quad (13)$$

$$\frac{\partial f}{\partial \dot{Q}1} = -a1 \cdot f1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{a2}{\sqrt{1-a2 \cdot \dot{Q}1}} - 1 \quad (14)$$

$$\frac{\partial f}{\partial frq} = a1 \cdot a3 \cdot y^o \quad (15)$$

och

$$\frac{\partial g}{\partial y} = a5 \cdot a8 \cdot eff \cdot (1-a2 \cdot \dot{Q}1) \cdot \frac{\partial Q}{\partial y} / frq \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial \alpha} &= a5 \cdot \frac{a8}{frq} \left[ \frac{\partial eff}{\partial \alpha} \cdot ((1-a2 \cdot \dot{Q}1) \cdot Q - a9 \cdot (frq-1) \cdot frq) + \right. \\ &\quad \left. + eff \cdot (1-a2 \cdot \dot{Q}1) \cdot \frac{\partial Q}{\partial \alpha} \right] \quad (17) \end{aligned}$$

$$\frac{\partial g}{\partial Q1} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \dot{Q}1} = a5 \cdot a8 \cdot eff \left[ -a2 \cdot Q + (1-a2 \cdot \dot{Q}1) \cdot \frac{\partial Q}{\partial \dot{Q}1} \right] / frq \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial g}{\partial frq} &= a5 \left[ -a7 + \frac{PEL}{f^2 frq} - \frac{a8 \cdot eff}{f^2 frq} \cdot ((1-a2 \cdot \dot{Q}1)Q - a9(frq-1)frq) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{a8 \cdot eff}{frq} \cdot (1-a2 \cdot \dot{Q}1) \cdot \frac{\partial Q}{\partial frq} - a9(2 \cdot frq - 1) \right] \quad (20) \end{aligned}$$

## APPENDIX 1

Med

$$f1(y, \alpha) = \begin{cases} (A1 \cdot \alpha + A2) \cdot y + A3 \cdot \alpha + A4 & \text{för } y \geq y_{\min} \\ \frac{(A1 \cdot \alpha + A2) \cdot y_{\min} + A3 \cdot \alpha + A4}{y_{\min}} \cdot y & \text{för } y < y_{\min} \end{cases}$$

där A1 - A4 är koefficienter och y<sub>min</sub> en brytpunkt i turbinens karakteristik-kurva.

Detta medför att (med arbetspunkten WP insatt) :

$$f1(y^{\circ}, \alpha^{\circ}) = \begin{cases} (A1 \cdot \alpha^{\circ} + A2) \cdot y^{\circ} + A3 \cdot \alpha^{\circ} + A4 & \text{för } y^{\circ} \geq y_{\min} \\ \frac{(A1 \cdot \alpha^{\circ} + A2) \cdot y_{\min} + A3 \cdot \alpha^{\circ} + A4}{y_{\min}} \cdot y^{\circ} & \text{för } y^{\circ} < y_{\min} \end{cases}$$

$$\frac{\partial f1}{\partial y} = \begin{cases} A1 \cdot \alpha^{\circ} + A2 & \text{för } y^{\circ} \geq y_{\min} \\ \frac{(A1 \cdot \alpha^{\circ} + A2) \cdot y_{\min} + A3 \cdot \alpha^{\circ} + A4}{y_{\min}} & \text{för } y^{\circ} < y_{\min} \end{cases}$$

$$\frac{\partial f1}{\partial \alpha} = \begin{cases} A1 \cdot y^{\circ} & \text{för } y^{\circ} \geq y_{\min} \\ \frac{A1 \cdot y_{\min} + A3}{y_{\min}} \cdot y^{\circ} & \text{för } y^{\circ} < y_{\min} \end{cases}$$

På motsvarande sätt med :

$$eff = af3 \cdot (\alpha - \alpha_{ref})^3 + af2 \cdot (\alpha - \alpha_{ref})^2 + af1 \cdot (\alpha - \alpha_{ref}) + af0$$

Funktionen anger hur verkningsgraden förändras då kaplanvinkeln  $\alpha$  avviker från den ideala (=kombineringsfelet).

Detta medför :

$$eff(\alpha^{\circ}) = af3 \cdot (\alpha^{\circ} - \alpha_{ref})^3 + af2 \cdot (\alpha^{\circ} - \alpha_{ref})^2 + af1 \cdot (\alpha^{\circ} - \alpha_{ref}) + af0$$

$$\frac{\partial \text{eff}}{\partial \alpha} = 3 \cdot \text{af3} \cdot (\alpha^\circ - \alpha \text{ref})^2 + 2 \cdot \text{af2} \cdot (\alpha^\circ - \alpha \text{ref}) + \text{af1}$$

Funktionen Q defineras enligt :

$$Q = a10 \cdot \left[ f1(y, \alpha) \cdot (1 - a2 \cdot \hat{Q}1) \right]^{1/2} \cdot a3 \cdot (\text{frq} - 1) \cdot y$$

Detta medför med insättning av arbetspunkten WP

$$Q^\circ = a10 \cdot (f1(y^\circ, \alpha^\circ) + a3 \cdot (\text{frq}^\circ - 1) \cdot y^\circ)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \hat{Q}1} = \frac{-a10 \cdot f1(y^\circ, \alpha^\circ) \cdot a2}{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial y} = a10 \cdot \left( \frac{\partial f1}{\partial y} + a3 \cdot (\text{frq}^\circ - 1) \right)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \alpha} = a10 \cdot \frac{\partial f1}{\partial \alpha}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial \text{frq}} = a10 \cdot a3 \cdot y^\circ$$

För att ytterliggare förenkla notationen införes :

$$\varphi1 = f1^\circ(y^\circ, \alpha^\circ)$$

$$\varphi2 = \frac{\partial f1}{\partial y}$$

$$\varphi3 = \frac{\partial f1}{\partial \alpha}$$

$$\varphi4 = \text{eff}(\alpha^\circ)$$

$$\varphi5 = \frac{\partial \text{eff}}{\partial \alpha}$$

$$\varphi6 = Q^\circ$$

$$\varphi7 = \frac{\partial Q}{\partial \hat{Q}1}$$

## APPENDIX 1

$$\varphi_8 = \frac{\partial Q}{\partial y}$$

$$\varphi_9 = \frac{\partial Q}{\partial \alpha}$$

$$\varphi_{10} = \frac{\partial Q}{\partial \text{frq}}$$

De linjäriserade differentialekvationerna ovan kan nu skrivas som :

$$0 = \theta_1 \cdot \Delta Q_1 + \theta_2 \cdot \Delta Q_1 + \theta_3 \cdot \Delta \text{frq} + \theta_4 \cdot \Delta y + \theta_5 \cdot \Delta \alpha$$

eller omskrivet på ordinarie sätt :

$$\Delta Q_1 = (\theta_2 \cdot \Delta Q_1 + \theta_3 \cdot \Delta \text{frq} + \theta_4 \cdot \Delta y + \theta_5 \cdot \Delta \alpha) / -\theta_1$$

respektive

$$\Delta \text{frq} = \theta_6 \cdot \Delta Q_1 + \theta_7 \cdot \Delta Q_1 + \theta_8 \cdot \Delta \text{frq} + \theta_9 \cdot \Delta y + \theta_{10} \cdot \Delta \alpha$$

med

$$\theta_1 = - \frac{a_1 \cdot \varphi_1 \cdot a_2}{2} - 1$$

$$\theta_2 = - a_1 \cdot a_4$$

$$\theta_3 = a_1 \cdot a_3 \cdot y^0$$

$$\theta_4 = a_1 (\varphi_2 + a_3 \cdot (\text{frq}^0 - 1))$$

$$\theta_5 = a_1 \cdot \varphi_3$$

$$\theta_6 = a_5 \cdot a_8 \cdot \varphi_4 \cdot (-a_2 \cdot \varphi_6 + \varphi_7) / \text{frq}^0$$

$$\theta_7 = 0$$

$$\theta_8 = a_5 (-a_7 + \frac{\text{PEL}}{\text{frq}^0}) + a_8 \cdot \varphi_4 \cdot \left( \frac{-\varphi_6 + a_9 \cdot (\text{frq}^0 - 1) \cdot \text{frq}^0}{\text{frq}^0} \right) +$$

$$+ \frac{\phi_{10} - a_9 \cdot (2 \cdot \text{frq}^0 - 1)}{\text{frq}^0} ) )$$

$$\theta_9 = a_5 \cdot a_8 \cdot \phi_4 \cdot \phi_8 / \text{frq}^0$$

$$\theta_{10} = a_5 \cdot a_8 \cdot (\phi_5 \cdot (\phi_6 - a_9 \cdot (\text{frq}^0 - 1) \cdot \text{frq}^0) + \phi_4 \cdot \phi_9) / \text{frq}^0$$

Laplace transformering och omskrivning av ekvationerna på matrisform ger :

$$\dot{Z} = \begin{bmatrix} -\frac{\theta_2}{\theta_1} & -\frac{\theta_3}{\theta_1} \\ \theta_7 - \frac{\theta_6 \cdot \theta_2}{\theta_1} & \theta_8 - \frac{\theta_6 \cdot \theta_3}{\theta_1} \end{bmatrix} \cdot Z + \begin{bmatrix} -\frac{\theta_4}{\theta_1} & -\frac{\theta_5}{\theta_1} \\ \theta_9 - \frac{\theta_6 \cdot \theta_4}{\theta_1} & \theta_{10} - \frac{\theta_6 \cdot \theta_5}{\theta_1} \end{bmatrix} \cdot U$$

$$\text{där } Z = [ \theta_1 \quad \text{FRQ} ]^T$$

$$U = [ y \quad \alpha ]^T$$

Det linjäriserade systemet kan då skrivas på formen :

$$\dot{Z} = A \cdot Z + B \cdot U$$

$$\text{FRQ} = [ 0 \quad 1 ] \cdot Z$$

Överföringsfunktionen för detta system kan skrivas :

$$FRQ = \frac{(a1 + b1 \cdot s) \cdot y + (a2 + b2 \cdot s) \cdot \alpha}{s^2 + d1 \cdot s + d0}$$

med :  $a1 = 02 \cdot 06 / 01$

$a2 = 02 \cdot 07 / 01$

$b1 = 09 - 06 \cdot 04 / 01$

$b2 = 010 - 06 \cdot 05 / 01$

$d1 = (02 + 06 \cdot 03) / 01 - 08$

$d0 = (03 \cdot 07 - 02 \cdot 08) / 01$





## APPENDIX 2

## Observeraren

Observerarens uppgift är att skatta flödet  $Q_1$  i den olinjära simuleringsmodellen WTURB.

Först förenklas WTURB till en första ordningens modell.

Detta medför att nedanstående differentialekvation för  $Q_1$  erhålles :

$$\frac{dQ_1}{dt} = 5 \cdot \left[ f_1(y, \alpha) \cdot \sqrt{H - T_1} \cdot \frac{dQ_1}{dt} + (frq - 1) \cdot A_5 \cdot y - Q_1 \right] \quad (1)$$

här är :  $T_1$  = vattnets anloppstid. Beror på vattenvägarna.  
 $Q_1$  = totala vattenflödet genom turbinen.  
 $frq$  = frekvensen  
 $A_5$  = koefficient i turbin karakteristiken.

Om rot-uttrycket approximeras enl.  $(1-p)^{1/2} \approx 1 - 1/2 \cdot p$

kan (1) skrivas som :

$$\frac{dQ_1}{dt} \approx \frac{5 \cdot (f_1 \cdot \sqrt{H} + (frq - 1) \cdot A_5 \cdot y - Q_1)}{1 + 5/2 \cdot f_1 \cdot T_1 / \sqrt{H}} \quad (2)$$

Estimatet av  $Q_1$  fås nu genom att sätta  $\hat{Q}_1 = Q_1$ .

Att få en bättre skattning av  $Q_1$  än vad ekvation (2) erbjuder är svårt pga att de praktiskt mätbara signalerna är så få.  
 I (2) har samtliga mätbara signaler bortsett från den elektriska effekten PEL utnyttjats.

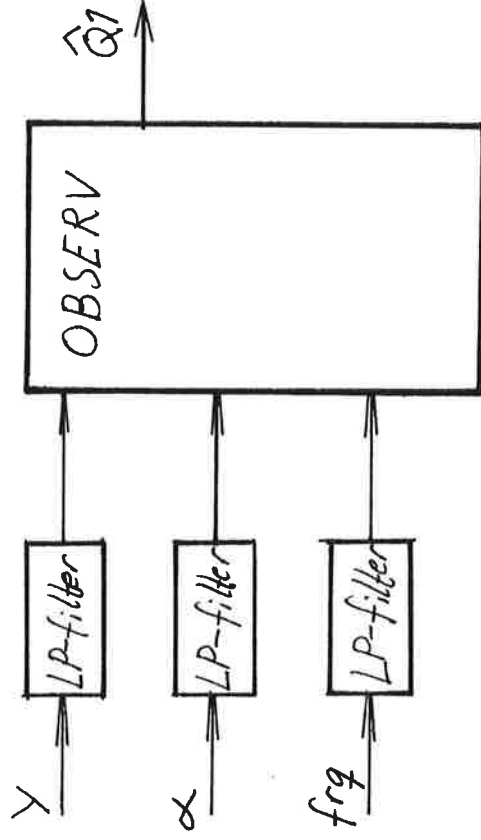
Simuleringar har visat att en observerare enligt (2) har ett godtagbart dynamiskt uppförande.

För att begränsa inverkan av brus från mätgivarna har observerarens ingångar försetts med låpassfilter enl :

$$Y = \frac{1}{s \cdot \omega_g + 1} \cdot U \quad (3)$$

med gränsvinkelfrekvens  $\omega_g$

Nedanstående figur visar en principskiss över kompletta observeraren.



Princip fig.  
Observerare med låpassfilter.