



LUND UNIVERSITY

Sammanträffande med representanter för kraftindustrin med anledning av projektet 'Koordinerad spännings- och turbinregulator' 1973.09.05

Lindahl, Sture

1973

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Lindahl, S. (1973). *Sammanträffande med representanter för kraftindustrin med anledning av projektet 'Koordinerad spännings- och turbinregulator' 1973.09.05*. (Technical Reports TFRT-7058). Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology (LTH).

Total number of authors:
1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

SAMMANTRÄFFANDE MED REPRESENTANTER FÖR
KRAFTINDUSTRIN MED ANLEDNING AV PROJEKTET
"KOORDINERAD SPÄNNINGS- OCH TURBINREGULATOR"
1973.09.05

STURE LINDAHL

Rapport 7326(C) September 1973
Inst.för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola

SAMMANTRÄFFANDE MED REPRESENTANTER FÖR KRAFTINDUSTRIN
MED ANLEDNING AV PROJEKTET "KOORDINERAD SPÄNNINGS-
OCH TURBINREGULATOR" 1973-09-05

Sture Lindahl

Detta arbete har utförts med stöd från Styrelsen för Teknisk
Utveckling under kontrakt nr 733607.

DELTAGARE:

J. Falck, Researchafdelningen, NESÄ

T. Petersson, Avd FKA, ASEA

A. Wedeen, Avd DSP, Statens Vattenfallsverk

Ä Ölwegård, Avd SKN, Statens Vattenfallsverk

K. J Åström, Reglerteknik, LTH

G. Olsson, -"-

G. Bengtsson, -"-

I. Gustavsson, -"-

P. Hagander, -"-

S. Lindahl, -"-

L. Ljung, -"-

T. van Overbeek, -"-

J. Wieslander, -"-

INNEHÅLL

1. Inledning och bakgrund	3
2. Presentation av projektet	4
3. Sammanfattning av diskussionen	15
4. Demonstrationen av de interaktiva analys- och syntesprogrammen SIMNON och SYNPAK	21
5. Slutsatser	35
6. Sammanträffande med representanter för Sydsvenska Kraftaktiebolaget 1973-09-21	

1. INLEDNING OCH BAKGRUND

K. J. Åström

Efter att ha hälsat alla deltagare hjärtligt välkomna erinrade professor Åström om den snabba utvecklingen av teorin som ägt rum under de senaste decennierna. Det är nu viktigt att dessa resultat knyts an till tillämpningarna och att resultaten förs ut i tillämpningarna. Vid institutionen för Reglerteknik har det pågått ett projekt, som lett fram till olika modeller för ångkraftverk samt till en ökad insyn i ångkraftverkens dynamiska beteende. Målet har dock varit att gå ut och styra processen. I det projekt, som nu statarts, är avsikten att ta fram en regulator för styrning av både spänning och frekvens på ett värmekraftverk. För att detta skall bli av värde för kraftindustrin vill vi hålla god kontakt med några representanter för kraftindustrin.

Avsikten med dessa kontakter skall vara dels att presentera det aktuella projektet och dels att få synpunkter på om inriktning, målsättning och begränsningar verkar vettiga.

2. PRESENTATION AV PROJEKTET

S. Lindahl

Målsättningen för detta sammanträffande är att få synpunkter på uppgifter för och begränsningar att ta hänsyn till vid konstruktion av en koordinerad spännings- och turbinregulator samt att demonstrera ett par interaktiva program för analys och syntes av reglersystem. Anledningen till att vi har tagit upp problematiken kring spännings- och frekvensreglering är att institutionen sedan länge har varit verksam inom detta och angränsande områden. Bland annat har olika modeller för dompannor + turbin tagits fram. Vidare har rumsstabilitetsproblem för kärnreaktorer behandlats. Slutligen har vi bekantat oss med stabilitetsproblem för kraftsystem. En disposition för presentationen visas i fig. 2.1.

KOORDINERAD SPÄNNINGS- OCH TURBINREGULATOR

1. Inledning och bakgrund
2. Krav på kraftsystemet
3. Spänningsreglering
Krav, egenskaper och begränsningar
4. Turbinreglering
Krav, egenskaper och begränsningar
5. Koordinerad spännings- och turbinregulator
Uppgifter och egenskaper

Fig. 2.1

2. 1 BAKGRUND (fig. 2.2)

Trots energikris får man räkna med att elförbrukningen kommer att fortsätta att öka. Det är dock inte otroligt att oljepriser och framlagda besparingsförslag kommer att leda till långsammare ökning än vad prognoserna förutser. Under de närmaste åren kommer kärnkraft och värmekraft att täcka den ökande efterfrågan. Under överskådlig framtid kommer kärnkraften ej att kunna användas vid t. ex. frekvensreglering. Den snart utbyggda vattenkraften kommer i framtiden ej att ha tillräcklig reglerkapacitet. Slutsatsen blir att värmekraften i framtiden kommer att få en ökad betydelse för både frekvens- och störningsreglering. Störningsregleringen kommer att bli svårare i framtiden då ett bortfall av ett enskilt aggregat kommer att introducera kraftiga störningar i systemet.

I framtiden kommer centraliserad styrning av kraftsystemet att medföra att ändringar av uteffekt och spänningsnivå beordras centralt.

Det är då viktigt att den lokala reglerutrustningen är av god kvalitet. Det är dock nödvändigt att beakta interferensen mellan de båda reglerkretsarna när man försöker förbättra den lokala regleringen.

1. Bakgrund

Ökad elkraftförbrukning

Kärnkraftens regleregenskaper

Vattenkraftens minskande betydelse

Värmekraftens ökade betydelse för reglering

Centraliserad styrning

Interferens

Fig. 2.2

2.2 KRAV PÅ KRAFTSYSTEMET (Bild 2.3)

För att kunna formulera kravet på reglerutrustningen i våra värmekraftverk bör vi först formulera kravet på kraftsystemet. Något abstrakt skulle man kunna säga att kravet är att:

Kraftsystemet skall förse förbrukarna med den efterfrågade elektriska kraften med en tillfredställande grad av kontinuitet och kvalitet till ett så lågt pris som möjligt.

För att uppnå en tillfredställande grad av kontinuitet kan vi försöka höja de enskilda aggregatens tillförlitlighet. Då vi trots allt måste räkna med aggregatbortfall, kan vi vidare se till att både statiska och dynamiska stabilitetsmarginaler är väl tilltagna. Vidare kan vi genom att se till att elektromekaniska pendlingar snabbt dämpas ut förhindra att vi tappar synkronism.

2. Krav på kraftsystemet

Kraftsystemet skall förse förbrukarna med den efterfrågade elektriska kraften med en tilfredställande grad av kontinuitet och kvalitet till ett så lågt pris som möjligt.

Kontinuitet

De enskilda aggregatens tillförlitlighet

Stabilitetsmarginalerna

Dämpningen av pendlingar

Maximal lastgradient

Gränser för underfrekvens och underspänning

Återstart

Kvalitet

Möjlighet att följa planerad belastningsändring

Snabbhet och noggrannhet i frekvensregleringen

Snabbhet och noggrannhet i spänningsregleringen

Ekonomi

Produktionsplanering

Körning på bästa verkningsgrad

Om vi nu klarat de första pendlarna men fortfarande har effektbrist kan situationen klaras om våra aggregat medger stora lastgradienter eller vi har vida gränser för underfrekvens och underspänning. Om situationen ej går att klara, måste vi dock klara att snabbt och säkert koppla bort last och göra en återstart. De faktorer som kan påverkas med våra reglersystem är framför allt stabilitetsmarginaler och möjligheten att dämpa ut pendlar. I vissa existerande reglersystem kan man hävda att gränser för lastsprång och lastgradient är snävare än vad panna + turbin tillåter.

De faktorer, som påverkar kvaliteten är bland andra: möjligheten att följa en planerad belastningsändring samt snabbhet och noggrannhet hos spännings och turbinregulatorer.

För att förbättra ekonomin får man räkna med centraliserad produktionsplanering. Lokalt kan man tänka sig att köra på bästa verkningsgrad.

2.3 SPÄNNINGSREGLERING (Fig. 4)

I dag regleras spänningen huvudsakligen lokalt, men en övergång till centraliserad styrning med avsikt att minimera överföringsförluster är att vänta. En sådan centraliserad styrning ställer dock inga krav på snabbheten i spänningsregleringen.

KRAFTSYSTEMETS EGENSKAPER VID SPÄNNINGSREGLERING

Det är ett faktum att snabb spänningsreglering medför att den statiska överföringsförmågan höjs i en förbindelse. Detta är en av anledningarna till att man i dag har tillgång till snabba tyristor-mat-are.

Om man nu höjer förstärkningen i spänningsregleringskretsen i avsikt att snabba upp spänningsregleringen, är det tyvärr så att man kan försämra dämpningen av elektromekaniska pendlingar. Lyckligtvis kan man genom att introducera tillsatssignaler på spänningsregulatorn förbättra dämpningen av dessa pendlingar.

NORDEL arrangerade i våras ett symposium om spänningsreglering och tillsatssignaler. Intrycket från detta symposium är att man har god förståelse för den teoretiska sidan av problemet, speciellt fallet med en generator med starkt nät.

3. Spänningsreglering

Krav

Överordnad styrning av börvärden ställer ej några definitiva krav på spänningsregulatorns snabbhet.

Egenskaper

Snabb spänningsreglering medverkar till höjd statisk överföringsförmåga.

Hög förstärkning i spänningsregulatorn kan resultera i försämrad dämpning av pendlingar.

Tillsatssignaler kan förbättra dämpningen av pendlingar

Tillsatssignaler kan orsaka spänningsvariationer vid ändring av aggregatets uteffekt

Begränsningar

Matarens utspänning

Fig. 2.4

Däremot har man fortfarande problem med spänningsvariationer när man varierar aggregatets uteffekt. I Kanada har man gått så långt att man kopplat bort tillsatsutrustningen vid ändring av aggregatets uteffekt. Speciellt svårt blir detta när systemet ej är stabilt utan dessa tillsatssignaler.

T. Petersson

Även i Sverige kopplar man bort tillsatsutrustningen vid ändring av aggregatets uteffekt.

Problemet bottnar i att det är skillnaden mellan mekanisk effekt och elektrisk effekt som accelererar rotorn och att den mekaniska effekten måste filtreras fram ur mätningen av den elektriska effekten. Om man för turbinregleringen har en modell för turbinen kan man genom modellrekonstruktion samt lämpliga mätningar få en god uppskattning av den mekaniska effekten. På detta sätt borde man kunna undvika den fasvridning som följer med högpassfiltrering av elektrisk effekt.

BEGRÄNSNINGAR VID SPÄNNINGSREGLERING

Man måste beakta att matarens utspänning är begränsad och att begränsningen kan bero av maskinens klämspänning.

2.4 TURBINREGLERING (Fig. 2.5)

Den efterfrågade elektriska effekten kan under längre tid ändras med 1 - 2%/min. Här betyder 1% att man går från 40% till 100% av maxeffekten på en timme. Om nu alla aggregat deltar i utregleringen av dessa belastningsvariationer, så betyder detta att aggregaten bör ha en maximal lastgradient, som är större än 1%/min. Om bara en del av aggregaten deltar, måste dessa klara proportionellt högre lastgradient. Centraliserad produktionsplanering och styrning kan komma att kräva större lastgradients. Störningsreglering ställer också krav på stora lastgradients. Om turbinregulatorn är återkopplad så att den åstadkommer ett linjärt samband mellan effektreferens och uteffekt så förenklas den centraliserade styrningen.

KRAFTSYSTEMETS EGENSKAPER VID TURBINREGLERING

För att skydda panna och turbin från alltför stora påkänningar finns i de flesta turbinregulatorer begränsningar på lastsprång och lastgradient. Tyvärr är det ibland så att dessa gränser är satta för att en icke förvarnad pannreglering skall få en enkel uppgift. Vid konstruktion av en ny regulator är det naturligt att låta de verkliga begränsningarna på panna och turbin vara avgörande för lastsprång och lastgradient.

4. Turbinreglering

Krav

Efterfrågan varierar 1-2% /min

Överordnad produktionsplanering kan kräva mer

Linjäritet mellan effektreferens och uteffekt underlättar överordnad styrning.

Egenskaper

Lastsprång och lastgradient är ofta satta för att pannregleringen skall få en enkel uppgift

Belastningen är beroende av spänning och frekvens

Begränsningar

Materialpåkänningar

Matarvattenreglering

Instabilitet i cirkulationen vid dompannor med naturlig cirk.

Kavitation i cirkulationspumparna vid dompannor med tvångs-cirkulation

Svårigheter att kontrollera förångningspunkten vid genomströmningspannor

Dessutom borde det vara möjligt att låta dessa gränser vara större vid krissituationer, som väntas inträffa mera sällan. Pannregleringen kan förenklas avsevärt genom framkoppling till bränsleflöde och/eller matarvattenflöde.

Vidare är det känt att belastningen beror på frekvens och spänning. Detta är också ett skäl för en koordination av spännings- och frekvensregleringen. Man bör således kunna använda spänningen för att reda upp en besvärlig störningsreglering.

BEGRÄNSNINGAR VID TURBINREGLERING

De allvarligaste begränsningarna, som är avgörande både för processens livslängd och säkra drift, vid turbinreglering är:

- A) Materialpåkänningar i samband med ändring av trycket. T.ex. anger tillverkaren av en dompanna med ångtrycket 200 bar och tvångscirkulation att trycket får ändras med $[-4, + 8]$ bar per minut (maximalt två minuter) med hänsyn till material-påkänningar. Detta sätter absoluta gränser för lastsprång och lastgradienter vid glidtrycksreglering. Om man däremot använder strypreglering kan man få högre värden på lastsprång och lastgradient.

- B) Matarvattenregleringen utsätts för svåra prov vid strypreglering.
- C) Instabilitet i cirkulationen vid dompannor med naturlig cirkulation.
- D) Kavitation i cirkulationspumparna vid dompannor med tvångscirkulation.
- E) Svårigheter att kontrollera förångningspunkten vid genomströmningspannor.

2.5 KOORDINERAD SPÄNNINGS- OCH TURBINREGULATOR (Fig. 6)

De uppgifter, som regulatorn skall klara av är att:

- A) Snabbt ändra aggregatets uteffekt vid störningsreglering.
- B) Hjälpa till att dämpa ut pendlingar.
- C) Hålla spänning och frekvens vid sina rätta värden.
- D) Klarar körning på bästa verkningsgrad.

Regulatorn skulle utrustas med följande faciliteter, som ej alltid är standard på existerande regulatorer:

- A) Uppskattar mekanisk effekt med hjälp av modell för turbingenerator samt mätningar.
- B) Utnyttjar lastens spänningsberoende för att underlätta störningsregleringen.
- C) Reagerar olika vid normal drift och vid skärpt drift.

5. Koordinerad spännings- och turbinregulator

Uppgifter

Ändrar snabbt aggregatets uteffekt vid störningsreglering

Hjälper till att dämpa ut pendlingar

Håller spänning och frekvens vid sina rätta värden vid lugn drift

Egenskaper

Uppskattar mekanisk effekt med hjälp av modell för turbin+ generator samt mätningar

Utnyttjar lastens spänningsberoende för att förenkla störningsregleringen.

Reagerar olika vid normal drift och vid skärpt drift

Fig 2.6

3. SAMMANFATTNING AV DISKUSSIONEN

T. Petersson:

Detta verkar vara en vettig ansats och liknar det som redan i dag existerar på vattenkraftaggregaten. Där har vi följande krets för att från turbinpådrag σ filtrera fram den mekaniska effekten

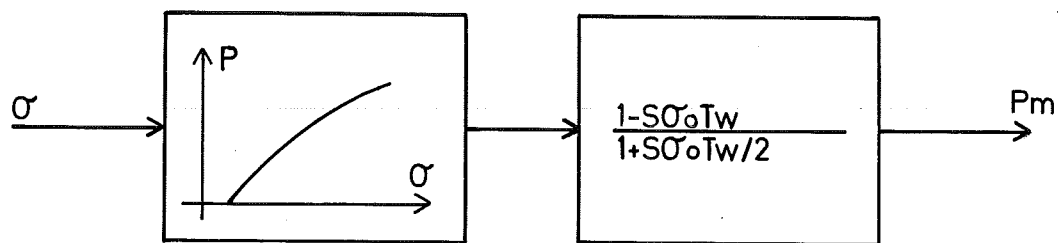


Fig. 3.1 Krets för rekonstruktion av mekanisk effekt på vattenturbiner.

S. Lindahl:

Det är en likartad tankegång vi skall försöka utnyttja oss av.

K. J. Åström:

Genom Karl Eklunds arbeten vet vi ganska väl hur sådana modeller ser ut.

A. Wedeen:

Avser du att använda dig av "fast valving"?

S. Lindahl:

Det skrivs mycket om "fast valving", men jag är inte alls säker på att det kommer att kunna tillämpas.

A. Övegård:

I Frankrike utnyttjar man tekniken med "fast valving" men i England varifrån den härstammar har man ingen anläggning i drift. I Kanada har man även "fast valving" i drift.

A. Wedeen:

Tekniken medger ju en snabb ändring av mekanisk effekt vid t.ex. kortslutningar och förhindrar i sådana fall att generatorn faller ur fas. Man måste dock medge att det innebär ett risktagande att så snabbt stänga och öppna reglerventilen.

J. Falck:

Kan det vara lämpligt att vid störningsreglering sänka spänningen och därmed minska överföringsförmågan?

S. Lindahl:

Om belastningen beror på spänningen som $P_o (V_1/V_o)^2$ och den överförda effekten beror av spänningen som $V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)/X_{12}$ så bör man nog kunna förenkla spänningsregleringen genom att sänka spänningen.

Å. Ölwegård:

Det är tveksamt om detta alltid är lämpligt: I Norge gör man så på vissa ställen, men där har man nästan resistiv belastning vars effekt beror kvadratisk av spänningen. I Sydsverige med stor asynleromotorbelastning gäller det att effekten beror kvadratisk av spänningen endast under en kort tid. Efter ett tag är det snarast så att exponenten är mindre än ett. I sådana fall skall man ej sänka spänningen.

S. Lindahl:

Detta verkar vara ett tveeggat vapen vilket kan användas som jag tänkt mig endast i speciella situationer.

A. Wedeen:

Bör man inte behålla tanken på att utnyttja spänningsregulatorn under störningsreglering men se till att i stället öka överföringsförmågan och täcka den brist på reaktiv effekt, som följer med ökad överförd effekt?

S. Lindahl:

Ja, det verkar vettigt.

T. Petersson:

Avser du att studera både värmekraftaggregat och vattenkraftaggregat?

S. Lindahl:

I första hand avser jag att titta på värmekraftverk eftersom det ju redan existerar utrustning för vattenkraftaggregaten.

T. Petersson:

Ångturbinen är ju också den drivkälla som kan svara inom det frekvensområde, som är aktuellt för reglering av pendlingar. Vid vattenkraftaggregat har man ju icke-minimum fas-egenskaper, som förhindrar så snabba svar.

K. J. Åström:

Det är en viktig synpunkt att man vid vattenturbiner har en tidsseparering av de båda kretsarna medan denna separering ej existerar vid ångturbiner.

S. Lindahl:

Kommer TIDAS att lösa alla reglerproblem centralt eller finns det fortfarande intresse av att utveckla de lokala reglersystemen?

Å. Ölwegård:

I första skedet kommer ju TIDAS endast att samla in och analysera data och först i ett senare skede kommer regleringen in. Goda lokala regulatorer kommer att kunna göra den ekonomiska produktionsplaneringen enklare.

S. Lindahl:

Kommer det att innebära stora problem att sammanföra regleringen av tre processer, som kanske levereras av tre skilda fabrikanter, till en regulator?

T. Petersson:

Tekniskt skall ju detta gå att klara. Vi har ju också klarat liknande problem tillsammans med NOHAB och STALLAVAL. Det är möjligt att det kan bli ett problem med informationsutbytet, då ju alla lever på sina kunskaper.

Å. Ölwegård:

När du har räknat på detta ett tag skall du väl genomföra prov med regulatorn. Var skall detta ske och hur skall det gå till? Kan ASEA hjälpa till?

S. Lindahl:

Vi har talat med Kjell Norbäck om detta och han är personligen positiv till att låta oss genomföra prov på Sydkrafts anläggningar men innan vi kan få tillåtelse till detta måste vi få godkännande från högre ort. Vi vill genomföra prov på anläggningar, där man enkelt kan komma in på ställdonen, magnetiseringsutrustningen och pådragsventilen.

T. Petersson:

När det gäller spänningsregulatorna bör detta vara enkelt på Öresundsverket, G16, Kanlshamnsverket, Stenungssund, G3 o G4. Där kan man gå in med ± 10 V signaler på styrelektroniken för magnetiseringsutrustningen. Vi har normalt ± 10 V utgångar på själva spänningsregulatorn.

4. DEMONSTRATION AV DE INTERAKTIVA ANALYS- OCH SYNTES- PROGRAMMEN SIMNON OCH SYNPAK

De båda programmen är utvecklade vid Institutionen för Reglerteknik, LTH och är implementerade på en PDP 15/40 med 32kord kärnminne. Maskinen är utrustad med skrivminne, magnetbandstationer, pappersremsläsare, pappersremsstans, bildskärm, radskrivare och skrivmaskiner. Båda programmen finns tillgängliga i form färdigallokerade absolutelement, som snabbt kan börja exekveras. För programmet SIMNON är det en stor fördel att ej behöva relokera varje gång man förändrar systembeskrivningen.

4.1 INLEDNING

För att kunna analysera olinjära system beskrivna av

$$\frac{dx}{dt} = f(x,u,p) \quad (1a)$$

$$y(t) = g(x,u,p) \quad (1b)$$

där x är tillståndsvektorn, u en vektor av insignaler, y en vektor av utsignaler och p en parametervektor, har det interaktiva simuleringsprogrammet SIMNON utvecklats. Användaren beskriver systemet i ett ALGOL-liknande språk, vars syntax ges i Appendix 1. Systembeskrivningen analyseras av en kompilator, som omvandlar systembeskrivningen till en sifferkod vilken utnyttjas varje gång integrationsrutinen behöver beräkna högerledet i differentialekvationen (1). Beräkningar, simuleringar, ändringar av initialvärden och parametrar samt plottning styrs av kommandon enligt Appendix 2. För analys av och syntes av regulatorer för linjära system beskrivna av

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu \quad (2a)$$

$$\dot{y} = Cx + Du \quad (2b)$$

där x är tillståndsvektorn, u en vektor av insignaler, y en vektor av utsignaler och A, B, C och D är konstanta matriser, har det interaktiva syntesprogrammet SYNPAK utvecklats. Användaren definierar sitt system genom att ge de numeriska värdena på elementen i systemmatriserna A, B, C och D . Dessa värden kan skrivas in och/eller ändras via skrivmaskin. Programmet accepterar vidare kommandon för olika matrisoperationer (inläsning, utskrift, addition, subtraktion, multiplikation, inversion, transposition, expansion och reduktion). Det kontinuerliga systemet (2) kan samplas, d.v.s. överföras på formen

$$x(t+T) = \Phi x(t) + \Gamma u(t) \quad (3a)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (3b)$$

där $u(t)$ är styckvis konstant. Det tidsdiskreta systemet (3) kan simuleras när $u(t)$ är någon av standardsignalerna (=0, Steg, ramp eller brus).

Programmet kan dessutom användas för linjärkvadratisk optimering vilket innebär att man söker den insignal $u(t)$, som minimerar

$$J = \sum_{t=0}^{\infty} x^T(t) Q_1 x(t) + u^T(t) Q_2 u(t)$$

Lösningen till detta optimeringsproblem är en linjär tidsinvariant återkoppling från samtliga tillstånd

$$u(t) = -L x(t)$$

4.2 Ett Exempel

Låt oss betrakta en synkronmaskin, som är ansluten till ett starkt nät via en förlustfri ledning.. Generatoren drivs av en ångturbin, som får ångan från en ångpanna med mellanöverhettare.

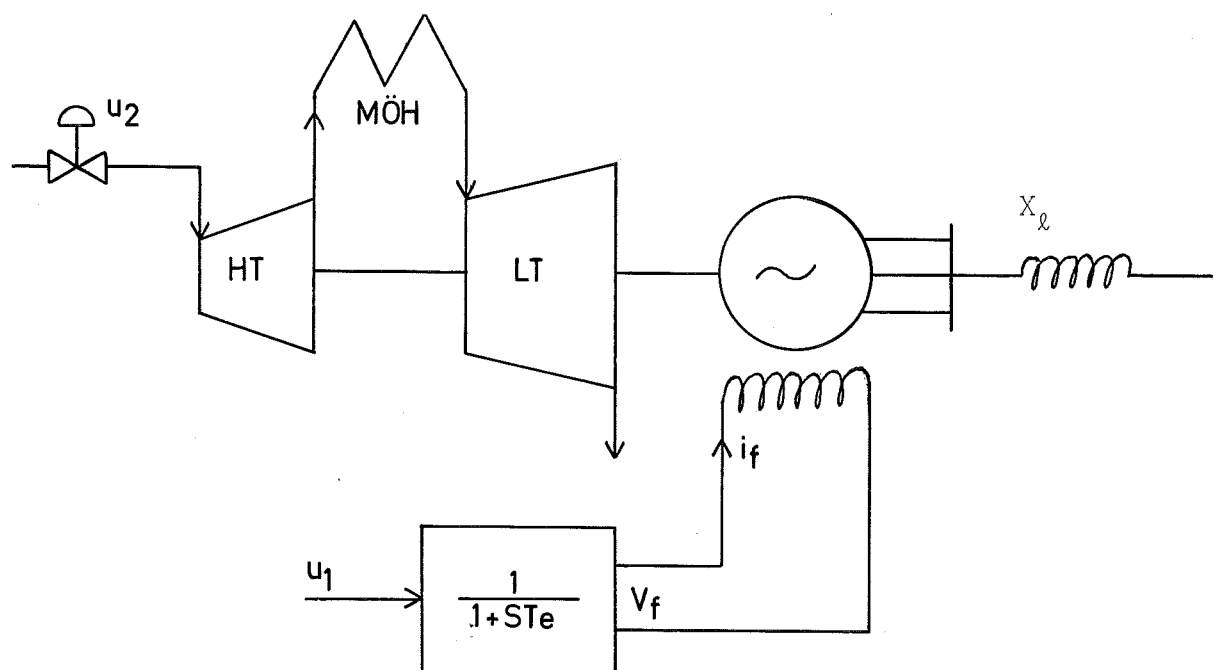


Fig. 4.1 Synkrogenerator med turbin

Systemet beskrivs av följande differentialekvationer

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega(\omega - 1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = [(P_m - P_e)/\omega - D(\omega - 1)]/(2M)$$

$$\frac{d\psi_f}{dt} = (v_f - i_f) / T_{d\phi}$$

$$\frac{dv_f}{dt} = (u_1 - v_f) / T_e$$

$$\frac{dP_\ell}{dt} = (C_\ell u_2 - P_\ell) / T_r$$

med

$$v_d = v_o \sin \theta / (1 + X_\ell / X_q)$$

$$v_q = (v_o \cos \theta + \psi_f X_\ell / X_d) / (1 + X_\ell / X_d)$$

$$i_f = \psi_f X_d / X_d - v_q (X_d - X_d) / (X_d * \omega)$$

$$i_d = (\psi_f - v_q / \omega) / X_d$$

$$i_q = v_d / (X_q * \omega)$$

$$P_m = (1 - C_\ell) u_2 + P_\ell$$

och utsignalerna

$$y_1 = V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2}$$

$$y_2 = \omega$$

$$y_3 = P_e = i_d V_d + i_q V_q$$

$$y_4 = Q = i_d V_q - i_q V_d$$

Parametervärdena har valts på följande sätt

$$H = 3.7$$

$$D = 0.0$$

$$T_{d\acute{o}} = 3.0$$

$$T_e = 0.1$$

$$T_r = 15.0$$

$$X_d = 2.3$$

$$X_q = 1.8$$

$$X_{\acute{d}} = 0.24$$

$$X_{\ell} = 0.7$$

$$C_{\ell} = 0.7$$

Systemet har linjäriserats vid en stationär punkt
där $P_m = P_e = 0.8$, $V_t = 1.0$ och $V_o = 1.0$

4.3 ANALYS OCH SYNTES AV LINJÄRISERAD MODELL

Kommandon i SYNPAK

```

SYNPAC VIE
>CLIST
>VDISP
>DEFI NX
#
5
>DEFI NU
#2
>DEFI NY
#9
>DEFI NPT
#500
>DEFI T
#0.02
>PREAD A
>,B
>,C
>,D
>,Q0
>,Q1
>,Q2
>ZEROM X0 NX 1
>ALTER X0 1 1
#0.5
>PRINT A
>,B
>,C
>,D
>,X0
>,Q1
>,Q2
Se fig. 4.2
<SAMP
>INSI U 1←ZERO
>INSI U 2←ZERO
>SIMU
>SHOW Y 5 6 / Se fig. 4.3

>SRIC
>USRIC
UR FILE NOT ON DEVICE
>INSI UR 1←ZERO
>INSI UR 2←ZERO
>USRIC
>YSRIC
>SHOW Y 5 6 / Se fig. 4.4

>STOP

```

A

0.00000	314.16	0.00000	0.00000	0.00000
-0.10740	-0.92565E-01	-0.14114	0.00000	0.13514
-0.71716	-0.51671	-1.0638	0.33333	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	-10.000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	-0.66667E-01

B

0.00000	0.00000
0.00000	0.40541E-01
0.00000	0.00000
10.000	0.00000
0.00000	0.46667E-01

C

-0.80513E-01	0.51249	0.52675	0.00000	-0.00000
0.00000	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000
0.79479	0.68499	1.0444	0.00000	0.00000
0.44603	1.0436	1.3027	0.00000	0.00000
1.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	1.0000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	1.0000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	1.0000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	1.0000

D

0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000
0.00000	0.00000

Q1

5.0000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	500.00	0.00000	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.10000E-03	0.00000	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.10000E-03	0.00000
0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	25.000

Q2

0.10000E-01	0.00000
0.00000	25.000

L

8.0870	-915.55	35.877	0.84443	-35.891
0.25450E-01	6.3309	-0.11270	-0.17824E-02	0.40761

Fig. 4.2 Systemmatriser, matriser i förlustfunktionen
samt återkopplingsmatrisen.

Y 5 6

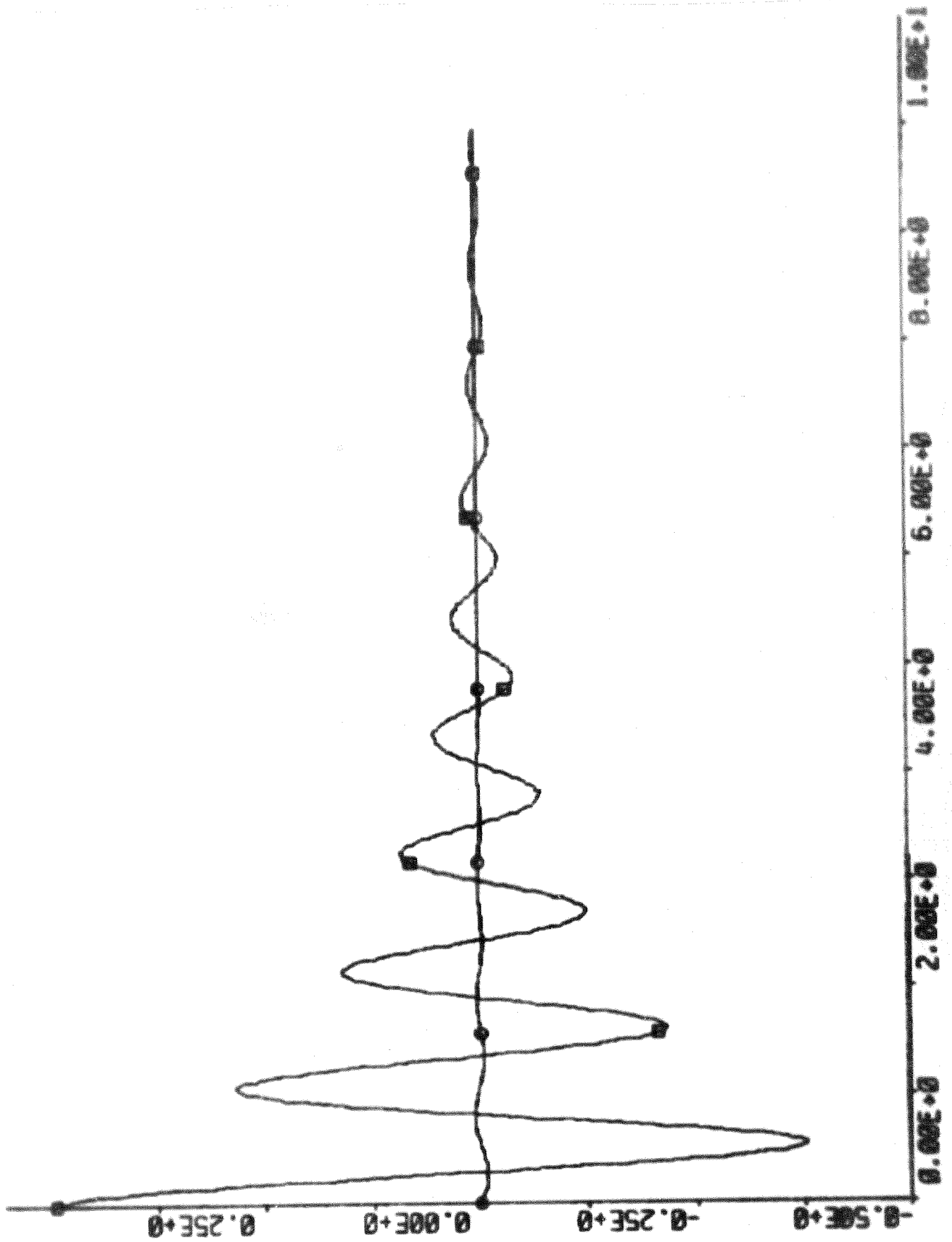


Fig. 4.3 Det öppna systemets insvängning från
 $\theta(0) = 0.5$

Y 5 6

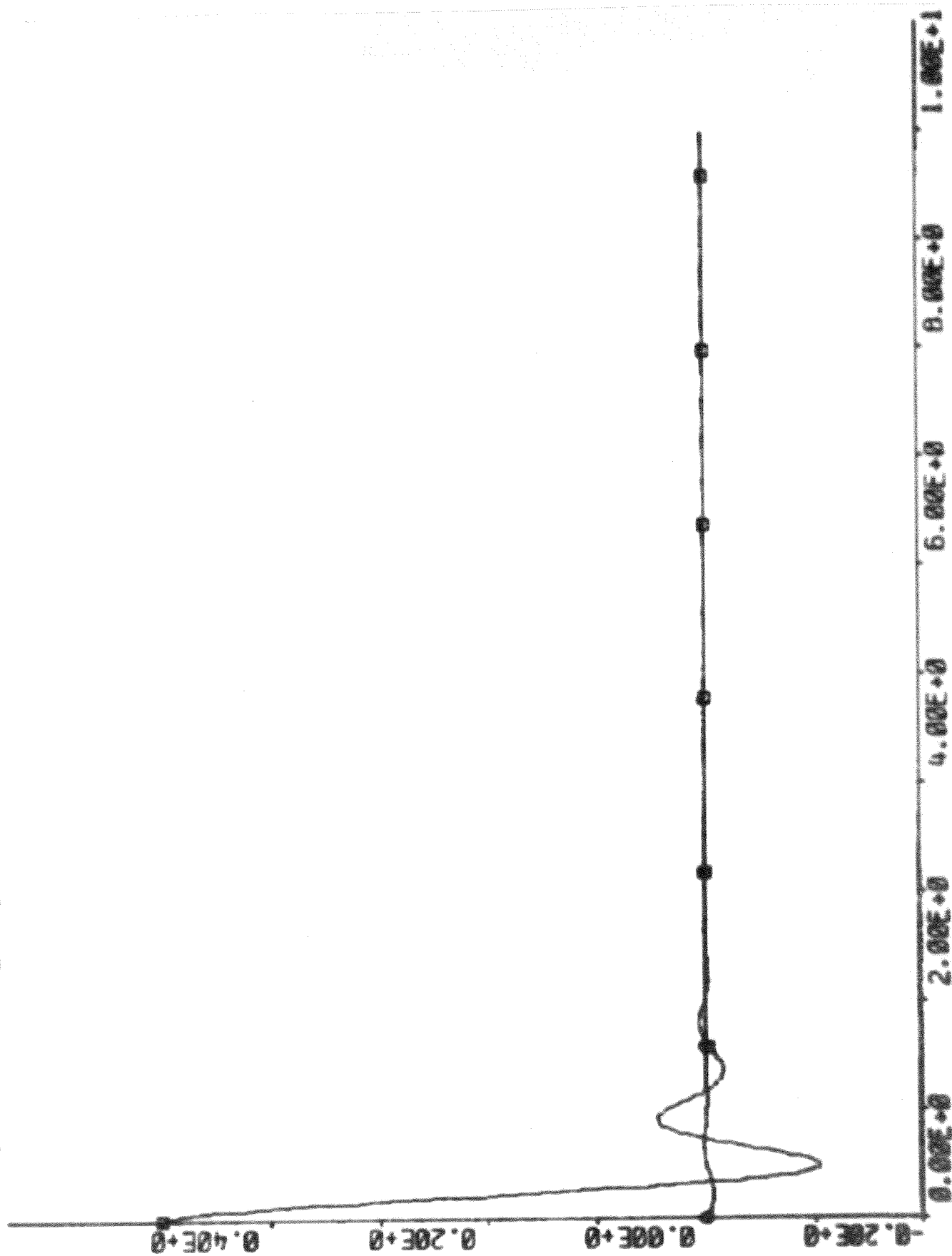


Fig. 4.4 Det återkopplade systemets insvängning
från $\theta(0) = 0.5$

4.4 ANALYS AV DEN OLINJÄRA MODELLEN

4.4.1 Systemekvationerna

W0=314.1593
TSTEP:1.0
D:0.0
H:3.7
TDOP:3.0
TE:0.1
TR:15.0
XD:2.3
XQ:1.80
XDP:0.24
XL:0.7
CL:0.7
L11:8.087
L12:-915.55
L13:35.877
L14:0.84443
L15:-35.891
L21:0.02545
L22:6.3309
L23:-0.1127
L24:-0.0017824
L25:0.40761
V0BAR:1.0
V0DEL:0.0
VTBAR:1.0
VTDEL:0.0
UTBAR:0.8
UTDEL:0.0
UEBAR:2.407
UEDEL:0.0
U1MIN:-10.0
U1MAX:10.0
U2MIN:0.0
U2MAX:1.5
X01:1.37955
X02:1.0
X03:0.884577
X04:2.40654
X05:0.56
XB1:0.989
XB2:1.0
XB3:0.71
XB4:1.09
XB5:0.14
Z1=X1-XB1
Z2=X2-XB2
Z3=X3-XB3
Z4=X4-XB4
Z5=X5-XB5

Systemekvationerna (forts.)

```

UB1=IF T>TSTEP THEN UEBAR+UEDEL ELSE UEBAR
UB2=IF T>TSTEP THEN UTBAR+UTDEL ELSE UTBAR
UE=UB1-L11*Z1-L12*Z2-L13*Z3-L14*Z4-L15*Z5
UE=IF UE>U1MAX THEN U1MAX ELSE UE
UE=IF UE<U1MIN THEN U1MIN ELSE UE
U1=UE
UT=UB2-L21*Z1-L22*Z2-L23*Z3-L24*Z4-L25*Z5
UT=IF UT>U2MAX THEN U2MAX ELSE UT
UT=IF UT<U2MIN THEN U2MIN ELSE UT
U2=UT
V0=IF T>TSTEP THEN V0BAR+V0DEL ELSE V0BAR
VD=V0*SIN(X1)/(1+XL/XQ)
VQ=(V0*COS(X1)+XL*X3/XDP)/(1+XL/XDP)
IFD=XD*X3/XDP-(XD-XDP)*VQ/(XDP*X2)
ID=(X3-VQ/X2)/XDP
IQ=VD/(XQ*X2)
Y1=SQRT(VD*VD+VQ*VQ)
Y2=X2
Y3=ID*VD+IQ*VQ
Y4=ID*VQ-IQ*VD
DX1=W0*(X2-1)
DX2=0.5*((1-CL)*U2+X5-Y3)/X2-D*(X2-1)/H
DX3=(X4-IFD)/TDOP
DX4=(U1-X4)/TE
DX5=(CL*U2-X5)/TR
*END

```

4.4.2 Kommandon i SIMNON

SIMNON VIE

>

SYSDK GEN

```

>AXIS H 3 10
>,V 0 4
>PLOT T-X1 X2 U1
>CX0 X01:2.9
>SIMU 0 10 200 | Se fig. 4.5
>CPAR U1MIN:0.0
>CPAR U1MAX:3.0
>AXIS
>SIMU 0 10 200 | Se fig. 4.6
>CPAR XL:3.2
>AXIS
>SIMU 0 10 200 | Se fig. 4.7
>STOP

```

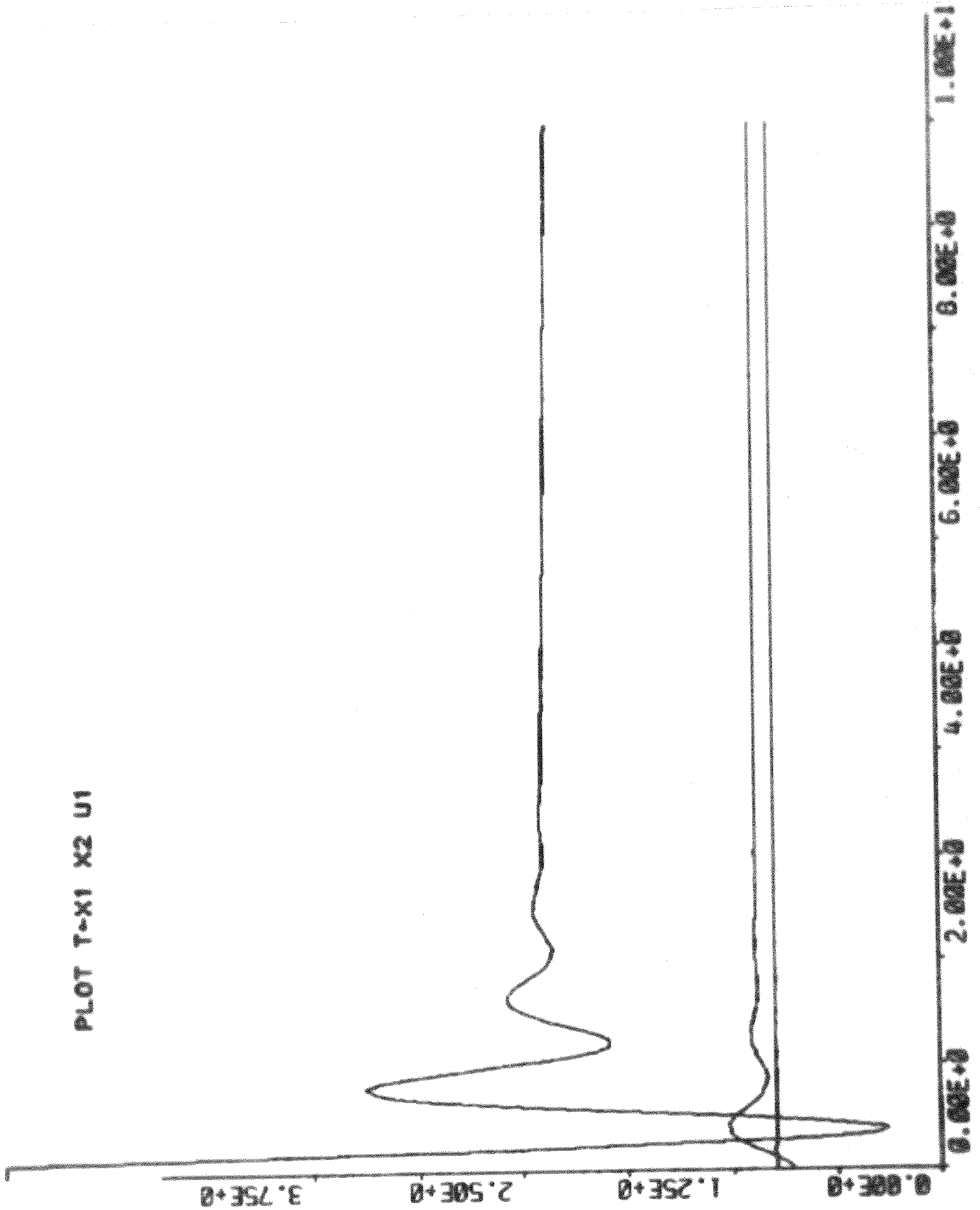



Fig. 4.5 Simulering av den olinjära modellen med styrslag från syntesen i SYNPAK.

PLOT T-X1 X2 U1

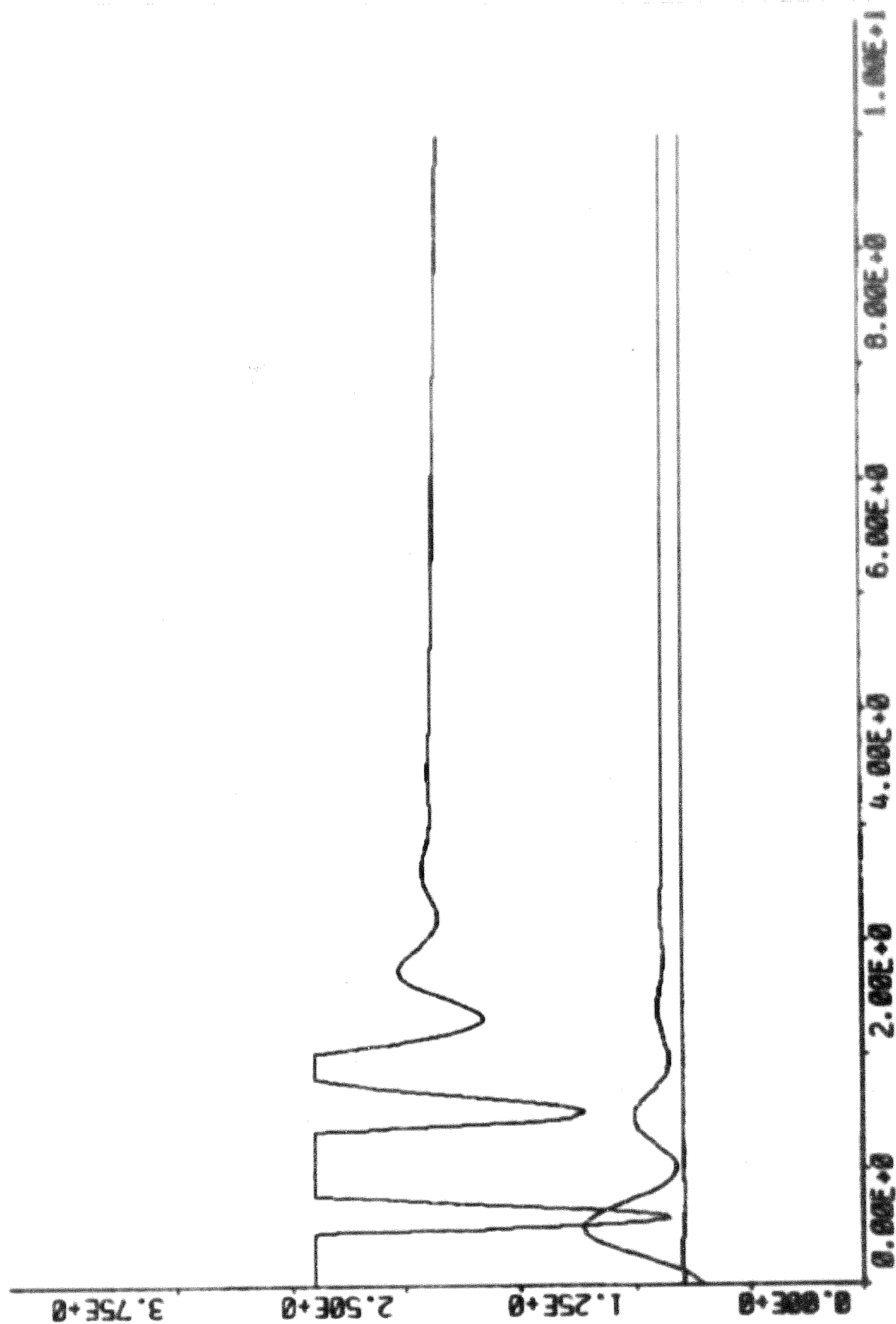


Fig. 4.6 Simulering av den olinjära modellen med styrlag från syntesen i SYNPAK. Begränsning på insignal till mataren.

PLOT T-X1 X2 U1

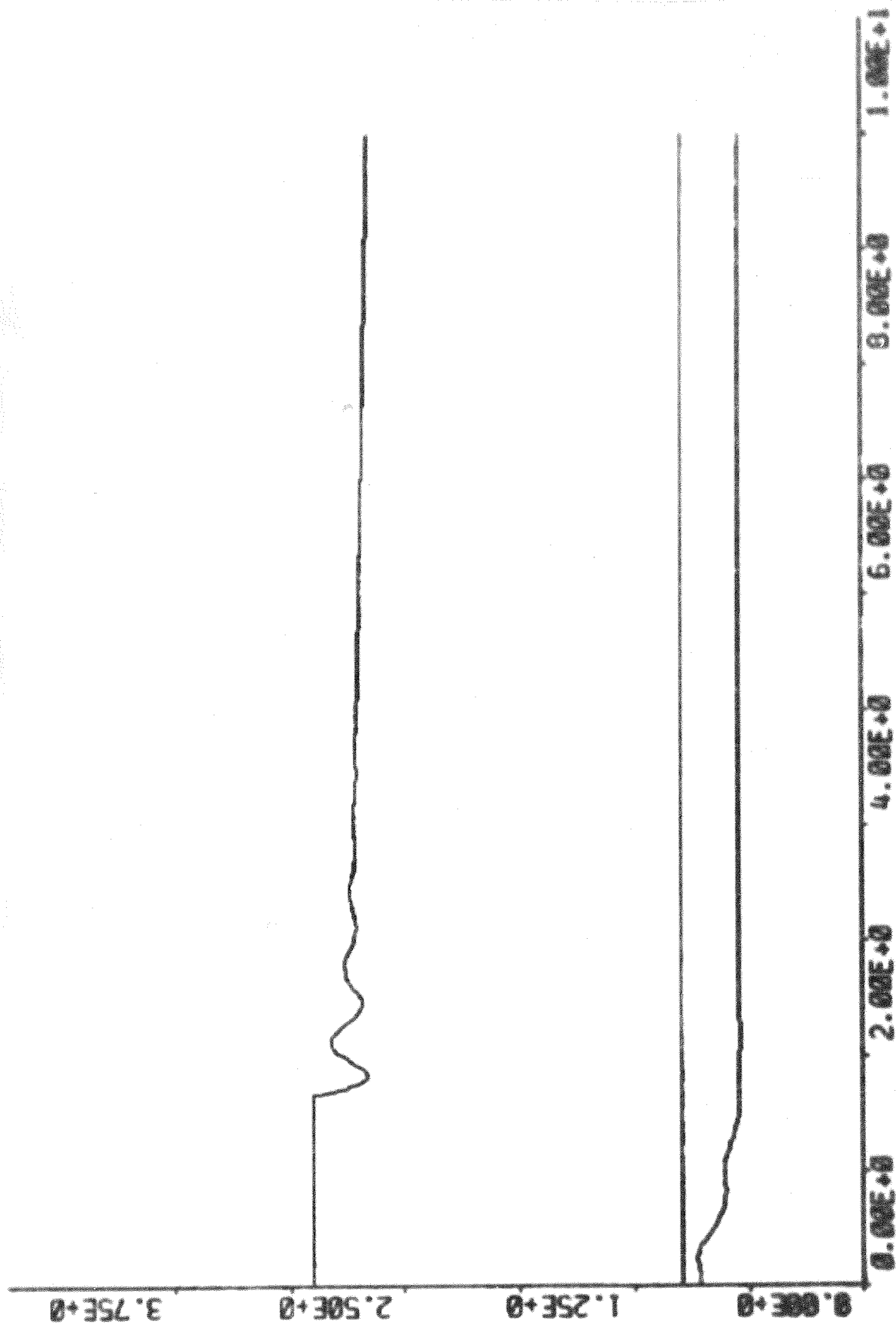


Fig. 4.7. Simulering av den olinjära modellen med styrlag från syntesen i SYNPAK. Begränsning på in-signal till mataren. Ledningsreaktarns 0.2

5. SLUTSATSER

Av denna första kontakt med Kraftindustrin i anledning av projektet "Koordinerad spännings- och turbinregulator" drar vi följande slutsatser; Det formulerade problemet måste anses relevant för kraftindustrin. Tekniken att använda en modell för att rekonstruera mekanisk effekt har använts med framgång vid vattenturbiner. Modellerna för ångturbiner är ej lika välkända men genom Karl Eklunds arbeten och mätningar har vi god insyn i dessa modelleringsproblem. Ångturbinen har på grund av frånvaron av icke-minimumfas-effekter större potentiella möjligheter att delta i frekvens- och störningsregleringen. Det är ett tveeggat vapen att sänka spänningen under störningsreglering. Däremot är det förnuftigt att kunna variera spänningen vid störningsreglering för att öka överföringsförmågan och täcka behovet av reaktiv effekt.

6. SAMMANTRÄFFANDE MED REPRESENTANTER FÖR SYDSVENSKA
KRAFTAKTIEBOLAGET 1973 - 09 - 21.

Närvarande:

K. Norbäck, Teknisk Utveckling

G. Tedestål, Värmetekniska Avdelningen

S. Lindahl, Reglerteknik

Sammanträffandet inleddes med att S. Lindahl redogjorde för bakgrunden till projektet och de önskemål och begränsningar som måste beaktas vid konstruktionen av en koordinerad spännings- och turbinregulator.

K. Norbäck:

Du har formulerat ett svårt problem, med önskemål som nästan uteslutande kommer från driften. Det är mycket svårt att få en överblick över alla de begränsningar, som man måste beakta och det är en nästan övermänsklig uppgift att väga önskemål mot begränsningar. NORDEL har tillsatt en arbetsgrupp för att på nordisk basis följa upp det arbete, som presenterades i "Värmekraftens drifttekniska egenskaper". G. Tedestål är vår representant i den arbetsgruppen och han kan redogöra för det arbetet.

G. Tedestål:

Arbetet i NORDEL:s arbetsgrupp för "Drifttekniska specifikationer för värmekraftverk" bedrivs i fem undergrupper och väntas bli färdigt under 1974. Undergrupperna skall studera driftförutsättningar, systemkrav, regleregenskaper

för kärnkraftverk, värmekraftverk och gasturbiner, frekvenstålighet, spänningstålighet samt drift på eget hjälpkraftsystem. Arbetsgruppens arbete kommer ej att resultera i detaljerade synpunkter på specifikationer för regulatorerna. Däremot kommer arbetet att mynna ut i en samordning av de krav, som vi i framtiden kommer att ställa på våra kraftverk.

I din sammanställning över krav och önskemål saknar jag specifikationer av skydds- och säkerhetskaraktär. Vad tar du dig till om en luftförvärmare går sönder? I så fall får verket ej stoppas men skall kunna drivas med reducerad effekt. De begränsningar som gäller idag är satta med hänsyn till lokala förhållanden. Det är svårt att övertyga driftpersonalen att gränserna skall sättas så att verket kan klara en besvärlig driftsituation ute i nätet. Det första kravet man måste ställa på spänningsregulatorn är att den inte skall försämra utdämpningen av pendlingar.

K. Norbäck:

Vi måste övertyga drifpersonalen om att det finns en värld utanför den egna stationen. Trots tecken på motsatsen kommer vi att fortsätta utbyggnaden av kärnkraften. Det är knappast troligt att vi kommer att bygga några fler oljeeldade värmekraftverk. Den politiska situationen gör att vi i framtiden ej kan räkna med fri tillgång på olja.

S. Lindahl:

Trots allt är det så att den existerande värmekraften kommer att få en ökad betydelse för regleringen. Vattenkraften minskar i betydelse och kärnkraften kommer ej att kunna användas för reglering i någon större omfattning.

G. Tedestål:

För att täcka det framtida effektbehovet utreder vi för närvarande en rad alternativ t.ex. gasturbiner med avgaspannor, gasturbiner med luftmagasin och pumpkraftverk. Den reglerutrustning som vi diskuterar kommer att få sin största betydelse för existerande värmekraftverk.

K. Norbäck:

Problemet med att gå in i existerande anläggningar är att man inte känner till alla begränsningar. På vilket sätt tänker du dig att utnyttja lastens spänningskänslighet?

S. Lindahl:

Ursprungligen hade jag tänkt mig att använda lastens spänningskänslighet för att kunna reducera effektbehovet vid störningsreglering. Vid mötet i Lund ansågs detta vara tveeggat, speciellt i södra Sverige där asynkronmotorbelastningen är hög och därmed spänningsberoendet lågt. På andra håll t.ex. i Norge utnyttjar man detta men där är lasten nästan resistiv. Det ansågs vara en förhållandevis stor nackdel att den statiska överföringsförmågan minskade. Jag är av den uppfattningen att man bör tillåta att spänningen får variera under störningsreglering om man därigenom på något sätt kan förenkla störningsregleringen.

K. Norbäck:

Problemet är delvis att vi ej känner belastningens spänningsberoende. Vi har gjort några experiment men vi kan ej ge några entydiga svar.

S. Lindahl:

Genom teoretisk analys, t.ex. den av J. Bubenko och T. Johansson, kan man bestämma lastens spänningskänslighet.

K. Norbäck:

Problemet är bara att vi vet ej hur stor del som är asynkronmotorbelastning. Den regulator, som vi diskuterar bestämmer sig för styringrepp på basis av lokalt tillgänglig information, t.ex. frekvens och spänning. Borde man inte bestämma sig för styringrepp på basis av vad som händer i det övriga nätet?

S. Lindahl:

Vid pendlingsförlopp skulle det ställa för höga krav på dataöverföringskapacitet. Vid störningsreglering däremot hinner den överordnade styrningen med att beordra effektändringar. Vår lokala reglerutrustning skall då snabbt och säkert kunna verkställa den beordrade effektändringen. G. Tedeståls invändning var att specifikationerna saknade krav och önskemål av skydds- och säkerhetskaraktär. Detta är en viktig synpunkt men jag känner mig inte säker på vilka fall som man bör beakta.

G. Tedestål:

Du kan titta på något modernt verk till att börja med.

S. Lindahl:

Har t.ex. Karlshamnsverket en tillfredställande lösning på dessa problem eller krävs modifikationer?

Kan Sydkraft ge mig sådana synpunkter?

G. Tedestål:

B. Egard skulle kunna berätta om skydds- och säkerhetsutrustningen på Karlshamnsverket.

K. Norbäck:

Hur stor effekt behövs för att dämpa ut de pendlingar som tidvis uppträder i det nordiska samkörningsnätet och kan turbinregleringen bidra?

S. Lindahl:

P. Langer eller Å. Ölwegård brukar säga att det räcker med att några tusen husmödrar slår till och från sin elspis.

G. Tedestål:

Det finns två problem när man försöker att ändra den mekaniska effekten snabbt. Det första är att man ej momentant får ut den effekt man väntar sig. Försök på Karlshamnsverket visade att man inte ens får ut den del av effektändringen, som svarar mot HT-turbinens andel av total-effekten. Vi vet inte om detta beror på termodynamiska förhållanden eller om det beror på ventilservots tröghet.

S. Lindahl:

G. Jönsson har i ett examinesarbete i reglerteknik undersökt detta och om man försummar den tid det tar att fylla upp HT-turbinen och trögheten i servot så skulle man få ca. 50 % momentant. Om man studerar K. Eklunds mätningar visar det sig att på Öresundsverket, Pl6 - Gl6 så kommer ca 65 % "momentant". Då samplingsintervallet är tio sekunder är det svårt att påstå att dessa 65 % verkligen kommer momentant.

Jag drar slutsatsen att den tidskonstant, som är förknippad med dessa 65 % avsevärt understiger tio sekunder. Troligen är det inbyggda begränsningar i ventilservot, som begränsar pådragshastigheten.

K. Norbäck:

Jag vill komma tillbaka till frågeställningen: Kan man använda turbinpådraget för att dämpa pendlingar? Kan man tillåta höga ändringshastigheter vid små ändringar?

G. Tedestål:

Ett av våra stora problem i andra sammanhang är just att få stora ventiler, som rör sig snabbt och säkert.

S. Lindahl:

Vid s.k. "fast Valving" gör man ju mycket stora och snabba ändringar av pådragsventilens läge. Tekniken tillämpas redan på vissa håll men det råder fortfarande viss tveksamhet om tillförlitligheten.

K. Norbäck:

Totala ändringen är liten och dess medelvärde är ungefär noll.

Slutsatser

Tekniken att kombinera spännings- och turbinregleringen har stora potentiella förutsättningar att bidra till en bättre reglering av kraftsystem. I en färdig produkt måste ingå skydds- och säkerhetsfunktioner. De föreslagna uppgifterna för regulatorn tycks vara avpassade till den överordnade styrning av kraftsystem, som väntas komma.

INBJUDAN TILL PRESENTATION AV OCH DISKUSSION KRING FORSKNINGSPROJEKT
DEN 5 SEPTEMBER 1973.

Institutionen för Reglerteknik, LTH har efter ansökan till STU beviljats medel för ett tvåårsprojekt "Koordinerad spännings- och turbinregulator". Under en första etapp skall analys och simulering samt förberedelse för fullskaleprov genomföras. I bilaga 1 presenteras bakgrunden till och närmare detaljer kring projektet.

För att projektet skall bli av värde för kraftindustrin anser vi det nödvändigt med en god kontakt med företrädare för kraftindustrin.

Vi inbjuder Er därför till en presentation av och en diskussion kring forskningsprojektet "Koordinerad spännings- och turbinregulator",
onsdagen den 5 september.

En preliminär tidsplan finns angiven i bilaga 2. Om svar anhålles senast den 3 september.

Med vänliga hälsningar

Sture Lindahl

KOORDINERAD SPÄNNINGS- OCH TURBINREGULATOR.

Bakgrund

Den snabba ökningen av elförbrukningen, som väntas fortsätta under 1970-talet, kommer till största delen att täckas av elektrisk energi producerad av värmekraftverk. Då vattenkraftstationernas reglerkapacitet ej kommer att öka i nämnvärd omfattning kommer värmekraftstationerna under 1970-talet att få en ökad betydelse för reglering av belastningsvariationer. Redan i "Värmekraftens drifttekniska egenskaper" /1/ påpekas att ny reglerutrustning, som dels anpassar effekten hos värmekraftaggregaten till bland annat nätfrekvens och överföringseffekter på vissa ledningar och som dels ombesörjer en snabb effektändring hos värmekraftaggregaten vid störningar bör utvecklas.

Normalt förekommer en mängd regulatorer som har till uppgift att reglera var sin storhet. För att förbättra regleregenskaperna har man kompletterat regulatorerna med olika tillsatssignaler eller framkopplingar. Vid dimensionering av de olika reglerkretsarna finns alltid en risk att dessa interfererar. Som exempel kan nämnas kopplingen mellan spänningsregleringskretsen och varvtalsregleringskretsen. Om förstärkningen i spänningsregleringskretsen justeras enbart i avsikt att generatorns utspänning snabbt skall anta sitt börvärde kan detta medföra en drastisk försämring av dämpningen i varvtalsregleringskretsen /2/. Detta kan få ödesdigra konsekvenser för kraftsystemets stabilitet. För att förbättra dämpningen har man utnyttjat tillsatssignaler. Den vanligaste tillsatssignalen är en effektsignal (vinkelderivatatillsats), som matas in på spänningsregulatorn. Problemet att välja förstärkning för tillsatssignalen om generatören kan anses arbeta mot ett starkt nät, bemästrar man i stor utsträckning. Introduktionen av pendlingar i reaktiv effekt och regulatorns uppförande i flermaskinfall är helt eller delvis öppna frågor. För att få en uppfattning om hur komplicerade reglerutrustningar man måste ta till för kraftsystem

med flera maskiner har inverkan av fullständig och begränsad tillståndsinformation undersökts /5/. En studie av ett tremaskinproblem indikerar att förnuftigt dimensionerade lokala regulatorer, som utnyttjar mätningar på enbart det egna aggregatet, är en rimlig ansats för vidare arbete. Den tidigare nämnda interferensen mellan spännings- och varvtalsregleringskretsen indikerar att åtminstone dessa två regulatorer bör ses som en enhet.

Problemformulering

Projektet syftar till konstruktion av en koordinerad spännings- och frekvensregulator, som vid en nätstörning snabbt ändrar aggregatets effekt, vid nätpendlingar bidrar till att dämpa ut pendlingarna och vid lugn drift håller spänning och frekvens vid sina börvärden samt justera uteffekten i avsikt att maximera verkningsgraden. Regulatorn skall med hjälp av mätningar av spänning, frekvens och elektrisk effekt justera magnetisering och mekanisk effekt. Projektet kan indelas i två faser:

- o Analys och simulering
- o Förberedelse av fullskaleprov

Analys och simulering

Uppgiften består i att med hjälp av en matematisk modell för aggregatet /3/, /4/ och nyutvecklade metoder för approximation av optimala styr-
lagar /5/ finna en lämplig struktur för och rimliga parametervärden i regulatorn. Matematiska modeller för de flesta ingående komponenterna finns tillgängliga och efter att ha fått tillgång till data för de aktuella aggregaten kan modellbyggnadsdelen anses avslutad. Merparten av analysen och simuleringen avser undersökning av regulatorparametrarnas beroende av driftpunkt, reaktanser och tröghetskonstant för generatortorn. Beroende på om parametervärden är

- 1) i stort sett konstanta,
- 2) beror av någon enstaka storhet eller
- 3) beror av driftpunkt, reaktanser och tröghetskonstant på ett invecklat

sätt måste regulatorn implementeras på olika sätt. I det första fallet är troligen en analog utrustning lämplig medan man i det andra fallet kanske får tänka sig en digital utrustning. I det tredje fallet kan en flervariable självinställande regulator komma ifråga. I samtliga implementeringsformer kommer regulatorn att innehålla den bästa uppskattningen av generators tillstånd. Regulatorn kommer således att ge en god lokal databas, som kan användas när mätvärden för hele systemet skall samlas upp.

Förberedelse av fullskaleprov

Uppgiften består i att undersöka hur en prototyp av regulatorn skall utformas för att man enkelt skall kunna genomföra prov på ett aggregat i full skala. Innan ett fullskaleprov kan komma till stånd måste kartläggas vilka säkerhetsåtgärder som måste vidtas i samband med provet. Vidare måste kraftsystemet utsättas för sådana störningar att man på ett rättvisande sätt skall kunna utvärdera regulatorns egenskaper.

Sydsvenska Kraft AB har vid en första förfrågan ställt sig positiv till att institutionen för Reglerteknik, LTH, får genomföra sådana prov i samarbete med företaget.

Referenser

- /1/ Värmekraftens drifttekniska egenskaper. Statens Vattenfallsverk, 1969.
- /2/ Ölwegård, Å.: Improvement of System Stability in Interconnected Power Systems. Statens Vattenfallsverk, 1970.
- /3/ Åström, K.J., Eklund, K.: A Simplified Nonlinear Model of a Drum Boiler-Turbine Unit. Int. J. Control, 1972, Vol. 16, No 1, pp 145 - 169.

- /4/ Lindahl, S.: A State Space Model of a Multimachine Power System, Report 7118, November 1971, Lund Inst. of Technology, Div of Automatic Control, Lund.
- /5/ Bengtsson, G., Lindahl, S.: A Design Scheme for Incomplete State or Output Feedback with Applications to Boiler and Power System Control, Report 7225(B), November 1972, Lund.

Preliminär tidsplan för presentation av och diskussion kring projektet

"Koordinerad spännings- och turbinregulator" den 5 september 1973.

- 10.00 Inledning
- 10.15 Presentation
- 11.00 Diskussion
- 12.00 Lunch
- 13.00 Visning av institutionen och demonstration av interaktiva analys och syntesprogram.
- 14.00 Ev. fortsatt diskussion.

Inbjudan utsänd till

S. Borglin, Inst. f. Värme och Kraftteknik, LTH

J. Ehlert Knudsen, Researchafdelningen, NESA

K. Norbäck, Avd. TU, Sydsvenska Kraftaktiebolaget

K. E. Johansson, Avd. FKH, ASEA

A. Wedeen, Avd. DSP, Statens Vattenfallsverk

Å. Ölwegård, Avd. SKN, -"-

Kopia för kännedom till

L. Lindeborg, STU.

B. Thoren, Avd. FKH, ASEA

APPENDIX 4.1

SYNTAX FÖR SPRÅKET I SIMNON

SYNTAX FOR SIMULATION-LANGUAGE

- A1 <letter>:=A/B/C/D/E/F/G/H/I/J/K/L/M/N/O/P/Q/R/S/T/U/V/X/Y/Z
- A2 <digit>:=0/1/2/3/4/5/6/7/8/9
- A3 <null>:=
- A4 <name>:=<letter>{<letter>/<digit>}₀⁴ --- <reserved word>
- A5 <variable>:=<name>
- A6 <parameter>:=<name>

Reserved word

- B1 <index>:={<digit>}₁[∞]
- B2 <state variable>:=X<index>
- B3 <derivative>:=D<state variable>
- B4 <insignal>:=U<index>
- B5 <outsignal>:=Y<index>
- B6 <time>:=T
- B7 <own function>:=FCN<index>
- B8 <one argument function>:=SIN/COS/EXP/SORT/ATAN/ABS
/ALOG/TANH/AINT
- B9 <two argument function>:=ATAN2/AMOD/SIGN
- B10 <boolean word>:=OR/AND/NOT/IF/THEN/ELSE
- B11 <reserved word>:=<state variable>/<derivative>
/<insignal>/<outsignal>/<time>
/<own function>/<one argument function>
/<two argument function>/<boolean word>

Function designator

- C1 <argument>:=<arithmetic expression>
- C2 <function designator>:=
 <own function>(<argument>)
 /<one argument function>(<argument>)
 /<two argument function>(<argument>,<argument>)

Number

- D1 <unsigned integer>:={<digit>}₁[∞]
- D2 <integer>:={<null>/+/-}<unsigned integer>
- D3 <decimal fraction>:=.<unsigned integer>
- D4 <exponent part>:=E<integer>
- D5 <decimal number>:=<unsigned integer>{<null>/.
 /<decimal fraction>
 /<unsigned integer><decimal fraction>
- D6 <unsigned number>:=
 <decimal number>{<null>/<exponent part>}
- D7 <number>:={<null>/+/-}<unsigned number>

Arithmetic expression

- E1 <adding operator>:=+/-
- E2 <multiplying operator>:=*//
- E3 <identifier>:=<state variable>/<derivative>/<insignal>
 /<outsignal>/<time>/<variable>/<parameter>
- E4 <primary>:=<unsigned number>/<identifier>
 /<function designator>/(<arithmetic expression>)
- E5 <factor>:=<primary>{+<primary>}₀[∞]
- E6 <term>:=<factor>{<multiplying operator><factor>}₀[∞]

- E7 <simple arithmetic expression>:={null}/<adding operator>
 <term>{<adding operator><term>}₀[∞]
- E8 <if clause>:=IF<boolean expression>THEN
- E9 <arithmetic expression>:=<simple arithmetic expression>
 /<if clause><simple arithmetic expression>ELSE
 <arithmetic expression>

Boolean expression

- F1 <relational operator>:=</=>
- F2 <relation>:=<simple arithmetic expression>
 <relational operator><simple arithmetic expression>
- F3 <boolean primary>:=<variable>/<parameter>/<relation>
 /(<boolean expression>)
- F4 <boolean secondary>:={<null>/NOT}<boolean primary>
- F5 <boolean factor>:=<boolean secondary>{AND<boolean secondary>}₀[∞]
- F6 <boolean term>:=<boolean factor>{OR<boolean factor>}₀[∞]
- F7 <boolean expression>:=<boolean term>
 /<if clause><boolean term>ELSE<boolean expression>

System description

- G1 <line terminator>:=<carriage return or alt mode>
- G2 <comment>:={<null>/"<the characters between " and
 <line terminator>}<line terminator>
- G3 <X0 definition>:=<state variable>:<number><comment>
- G4 <parameter definition>:=<parameter>:<number><comment>
- G5 <own function definition>:=
 * <own function>{<comment>}₁[∞]
 {<argument value><function value>{<comment>}₁[∞]}₂[∞]
 *FIN<comment>
- G6 <argument value>:=<number>
- G7 <function value>:=<number>

G8 <left part>:=<derivative>/<insignal>/<outsignal>/<variable>

G9 <assignment statement>:=<left part>={<arithmetic expression>
/<boolean expression>}<comment>

G10 <system description>:={<X0 definition>
/<parameter definition>/<own function definition>
/<assignment statement>/<comment>}₀[∞]
*END<comment>

KOMMANDON I SIMNON

SYSTT{<null>/<filename>}<comment>

SYSDK<filename><comment>

<filename>:={<letter>/<digit>}₁⁵

DISP<comment>

CX0<X0 definition>

CPAR<parameter definition>

PLOT<identifier>+{<identifier>}₁¹⁰ <comment>

AXIS{<null>/{H/V}<minimum value><maximum value>}<comment>

<minimum value>:=<number>

<maximum value>:=<number>

COMPU{<start value>/, }₁ⁱ{<stop value>/, }_j^j{<number of intervals>/, }_k^k
 {{MARK}}₁[∞]}₁¹<comment>

$1 \geq i \geq j \geq k \geq 1 \geq 0$

SIMU{<start value>/, }₁ⁱ{<stop value>/, }_j^j{<number of intervals>/, }_k^k
 {{CONT/MARK/<upper error bound>}}₁[∞]}₁¹<comment>

$1 \geq i \geq j \geq k \geq 1 \geq 0$

<start value>:=<number>

<stop value>:=<number>

<number of intervals>:=<integer>

<upper error bound>:=<number>

STOP<comment>

Appendix 4.3

KOMMANDON I SYNPAK

 * LIST OF COMMANDS *

GENERAL FORM

STANDARD ARGUMENTS

ENTER FNAME NX NY	NONE
PREAD FNAME	NONE
DREAD FNAME<-FNAME	NONE
TYPE FNAME	NONE
PUNCH FNAME	NONE
PRINT FNAME	NONE
WRITE FNAME<-FNAME	NONE
DISP FNAME	NONE
SHOW FNAME N1 (N2 N9)	NONE
DRAW (NOT IMPLEMENTED)	
ALTER FNAME NX NY	NONE
DEFI NAME	NONE
INSI FNAME NR<-NAME	U NR<-STEP
MLINK SNAME<-FNAME1 (FNAME2 FNAME9)	NONE
COMML FNAME	NONE
DKDLT FNAME	NONE
DTDLT FNAME	NONE
DKXCT FNAME	NONE
CLOSE	
VPRIN	
VDISP	
CLIST	
FLIST (NOT IMPLEMENTED)	
FILEC (NOT IMPLEMENTED)	
LOG COMMENTS	
SAMP SNAME<-SNAME	DSYST<-CSYST
SIMU FNAME<-SNAME FNAME	Y<-DSYST U
SRIC FNAME<-SNAME SNAME	L<-DSYST DLOSS
TRIC (NOT IMPLEMENTED)	
USRIC FNAME<-SNAME FNAME FNAME	U<-DSYST L UR
YSRIC FNAME<-SNAME FNAME FNAME	Y<-DSYST L UR
ZEROM FNAME NX NY	NONE
UNITM FNAME NX	NONE
MATOP FNAME<-FNAME (OP FNAME)	NONE
EXPAN FNAME<-FNAME TYPE I1 I2 FNAME	NONE
REDUC FNAME<-FNAME TYPE I1 I2	NONE
SOLVE FNAME<-FNAME FNAME	NONE
EIGEN (NOT IMPLEMENTED)	
STOP	

<- MEANS LEFTARROW

ARGUMENTS WITHIN PARENTHESIS ARE OPTIONAL

FNAME=FILENAME; SNAME=SYSTEMNAME; NAME=RESERVED ARGUMENT

TYPE=ROW OR COL; I1,I2=DIGIT; NX,NY,NR,N1-N9=DIGIT OR RESERVED ARGUMENT

OTHERS RESERVED ARGUMENT

 * COMMAND FUNCTION *

ENTER - MATRIX INPUT TO DK1 FROM KEYBOARD
 PREAD - MATRIX INPUT TO DK1 FROM PAPER READER
 DREAD - MATRIX INPUT TO DK1 FROM DT2
 TYPE - MATRIX OUTPUT FROM DK1 TO TELETYPEWRITER
 PUNCH - MATRIX OUTPUT FROM DK1 TO PAPER PUNCH
 PRINT - MATRIX OUTPUT FROM DK1 TO LINE PRINTER
 WRITE - MATRIX OUTPUT FROM DK1 TO DT2
 DISP - MATRIX OUTPUT FROM DK1 TO DISPLAY
 SHOW - DRAW A CURVE ON DISPLAY
 DRAW - NOT IMPLEMENTED
 ALTER - CHANGE A MATRIX ELEMENT, COLUMN OR ROW
 DEFI - DEFINE NEW VALUE OF RESERVED ARGUMENT
 INSI - INITIATE INPUT SIGNAL MATRIX. NAME=RAMP,STEP,PULSE,NOISE,PRBS
 OR ZERO
 MLINK - DEFINE NAMED FILE ON DK1 CONTAINING MATRIX NAMES
 COMML - DEFINE NAMED FILE ON DK1 CONTAINING COMMANDS
 DKDLT - DELETE A FILE ON DK1
 DTDLT - DELETE A FILE ON DT2
 DKXCT - EXECUTE COMMANDS FROM A NAMED FILE ON DK1
 CLOSE - CLOSE DKXCT OR COMML
 VPRIN - PRINT LIST OF RESERVED ARGUMENTS ON LINE PRINTER
 VDISP - PRINT LIST OF RESERVED ARGUMENTS ON DISPLAY
 CLIST - PRINT LIST OF COMMANDS ON LINE PRINTER
 FLIST - NOT IMPLEMENTED
 FILEC - NOT IMPLEMENTED
 LOG - FOR COMMENTS
 SAMP - COMPUTES A DISCRETE SYSTEM FROM A CONTINUOUS SYSTEM
 SIMU - SIMULATE SAMPLED SYSTEMS WITH INSIGNAL
 SRIC - COMPUTES THE STATIONARY SOLUTION TO THE RICCATIEQUATION
 TRIC - NOT IMPLEMENTED
 USRIC - GENERATE INSIGNAL FROM THE SOLUTION TO THE RICCATIEQUATION
 YSRIC - GENERATE OUTSIGNAL FROM THE SOLUTION TO THE RICCATIEQUATION
 ZEROM - DEFINE ZERO MATRIX
 UNITM - DEFINE UNITMATRIX
 MATOP - MATRIXOPERATION $A=B$, $A=B^{-1}$, $A=B - C$, $A=B + C$, $A=B * C$, $A=B^{-1} C$, $A=B^T$
 EXPAN - EXPAND A MATRIX WITH COLUMNS OR ROWS. TYPE=COL OR ROW
 REDUC - REDUCE A MATRIX WITH COLUMNS OR ROWS. TYPE=COL OR ROW
 SOLVE - SOLVE THE MATRIX EQUATION $A*X=B$
 EIGEN - NOT IMPLEMENTED
 STOP - RETURN TO KEYBOARD MONITOR