

CODEN: LUTFD2/(TFRT-5377)/1-71/(1988)

Analys av turbinregleringen i vattenkraftaggregat

Bo Nilsson

Institutionen för Reglerteknik
Lunds Tekniska Högskola
Januari 1988

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET

UTLÅNAS EJ

Department of Automatic Control Lund Institute of Technology P.O. Box 118 S-221 00 Lund Sweden		<i>Document name</i> Master Thesis	
		<i>Date of issue</i> January 1988	
		<i>Document Number</i> CODEN: LUTFD2/(TFRT-5377)/1-72/(1987)	
<i>Author(s)</i> Bo Nilsson		<i>Supervisor</i> Sture Lindahl, Sydkraft and Gustaf Olsson, LTH	
		<i>Sponsoring organisation</i>	
<i>Title and subtitle</i> Analys av turbinregleringen i vattenkraftaggregat. (Analysis of the turbin governor in hydroelectric power plants).			
<i>Abstract</i> <p>It is of great importance to have a stable frequency in an electrical power system based on AC, e.g. the NORDEL system. Consumption variations, which cause deviations from nominal frequency, must be corrected by generation adjustments. This automatic regulation of generation is taken care of, under normal operational conditions, with the help of certain electrical power plants. These power plants respond to a frequency deviation from the nominal frequency with a change in the power output. The plants have, in other words, composite regulating characteristics (MW/Hz). The level of the composite regulating characteristics (MW/Hz) is determined by, among other things, the turbin governors.</p> <p>The purpose of this thesis has been to investigate if the composite regulating characteristic (MW/Hz) of hydroelectric power plants can be increased, without the regulation work increasing unproportionally. The work has been done using simulation of turbine governor models with recorded net frequency values as input. Consideration has been taken of NORDELs recommendations for frequency regulation.</p> <p>The results of the simulations show that the composite regulating characteristic (MW/Hz) can be raised without an unacceptable increase in the amount of regulation. If meanwhile, the time constant for the governor remains unchanged, the the character of the controlling system (e.g. rise time) does not change either, which is an advantage. Suggestions for governor adjustments have been given, which are especially adapted to NORDELs recommendations.</p>			
<i>Key words</i>			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i>			<i>ISBN</i>
<i>Language</i> Swedish	<i>Number of pages</i> 72	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			

The report may be ordered from the Department of Automatic Control or borrowed through the University Library 2, Box 1010, S-221 03 Lund, Sweden, Telex: 33248 lubbis lund.

SAMMANFATTNING

En stabil frekvenshållning i ett kraftsystem för växelström, exempelvis NORDEL-systemet, är av största betydelse. Konsumtionsvariationer, som orsakar avvikelser i nätfrekvensen från nominell frekvens, måste korrigeras med produktionsändringar. Denna automatiska reglering av produktionen sköts vid normala driftförhållanden med hjälp av vissa kraftaggregat som svarar med en effektändring på en frekvensavvikelse från nominell frekvens. Aggregaten har med andra ord en reglerstyrka. Nivån på reglerstyrkan bestäms bl a av turbinregulatorerna.

Syftet med detta examensarbete har varit att undersöka om reglerstyrkan på vattenkraftaggregat kan höjas utan att utfört reglerarbete ökar oproportionellt mycket. Arbetet har utförts genom simulering av turbinregulatormodeller med inspelade nätfrekvensvärde som indata. Hänsyn har också tagits till NORDEL:s rekommendationer för frekvensreglering.

Resultaten från simuleringarna visar att reglerstyrkan kan höjas utan en orimlig ökning av reglerarbetet. Om samtidigt tidskonstanten för regulatorn behålls oförändrad ändras inte karaktären (exempelvis stigtiden) hos reglersystemet, vilket är en fördel. Förslag till regulatorinställningar speciellt anpassade till NORDEL:s rekommendationer har också getts.

FÖRORD

Detta examensarbete är knutet till Institutionen för Reglerteknik vid Lunds Tekniska Högskola och har utförts på uppdrag av SYDKRAFT AB, avdelning PDS.

Arbetet behandlar frekvensreglering av vattenkraftaggregat. Programpaketen SIMNON och IDPAC har använts.

Jag vill här passa på att tacka mina handledare Sture Lindahl på SYDKRAFT och Gustaf Olsson på Institutionen för Reglerteknik. De har spenderat mycket av sin dyrbara tid på att hjälpa till med idéer och förslag på olika problem som jag stött på. Stort tack för all hjälp även till övrig personal på avdelning PDS och Institutionen för Reglerteknik.

INNEHÅLL

1. INLEDNING

1.1 BAKGRUND

1.2 SYFTE

2. PROBLEMBESKRIVNING

2.1 AUTOMATISK FREKVENSSREGLERING

2.1.1 Bakgrund

2.1.2 Regulator

2.1.3 Reglerstyrka

2.2 FREKVENSDATA

2.2.1 Uppmätning och beräkning av frekvensvärde

2.2.2 Statistiska aspekter på frekvensvärde

2.3 MODELL FÖR TURBINREGULATOR

2.3.1 Modell kontra verklighet

2.3.2 Ursprunglig modell

2.3.3 Förenklad modell

2.3.4 Extra funktioner för utvärderingen

3. GENOMFÖRANDE

3.1 ARBETSMETOD

3.2 SIMULERING

4. RESULTAT

4.1 DIAGRAM OCH TABELLER

4.2 OBSERVATIONER

4.3 GODHETSTAL

5. SLUTSATSER

APPENDIX

- A Definitioner, NORDEL-karta och exempel på regleranläggning för vattenkraftaggregat
- B Blockschema och beteckningar för modellerna
- C Diagram, simuleringskurvor och tabell
- D Referenser

1. INLEDNING

För att placera in detta examensarbete i ett större sammanhang ges i avsnitt 1.1 en kort beskrivning av principen för frekvenshållning i det nordiska elnätet. Det viktiga begreppet reglerstyrka förklaras också kortfattat. Målet för examensarbetet presenteras i avsnitt 1.2.

1.1 BAKGRUND

NORDEL, som startades 1963, är en organisation sammansatt av personer verksamma i kraftföretag i Norden. Organisationens mål är att främja ett samarbete över gränserna, främst i Norden, vad det gäller elkraft. Strävan är att få en så rationell produktion, distribution och konsumtion av elenergi som möjligt för de deltagande länderna, så att en säker elförsörjning till en minimal kostnad kan erbjudas abonnenterna. Den diversifierade elkraftproduktionen i Norden och de många förbindelserna mellan länderna bidrar i hög grad till en ekonomisk samkörning. Se kartan över NORDEL-systemet i appendix A.

Denna samkörning innebär att elnäten i Finland, Norge, Sverige och östra Danmark är ihopkopplade växelströmsmässigt och därför ligger på samma medelfrekvens - med andra ord ett synkront system. Första steget mot detta nordiska samarbete togs redan år 1915, då Själland och Skåne fick en elektrisk förbindelse mellan Helsingborg och Helsingör via en 25 kV-kabel.

Elkraft (växelström) kan som bekant inte lagras och man måste därför alltid hålla produktion och konsumtion av elkraft i balans. I det nordiska elsystemet sköts detta med hjälp av produktionsstyrning. Med produktionsstyrning menas all avsiktlig påverkan av produktionen av elenergi i ett kraftsystem. Denna styrning sker både manuellt och automatiskt och kan delas upp i följande grupper.

- Produktion enligt i förväg uppgjord plan baserad på konsumtionsprognos
- Automatisk frekvensreglering
- Justering av elproduktionen, p g a ändrade förutsättningar

I detta arbete behandlas den automatiska frekvensregleringen.

För att hålla en hög kvalitativ nivå på elkraften utarbetades under 1970-talet riktlinjer för bl a frekvenshållningen i NORDEL-systemet. För att kunna uppfylla dessa krav krävs att varje land håller en viss reglerstyrka. Reglerstyrkan kan kort beskrivas som effektändringen ett elkraftproducerande aggregat svarar med på en avvikelse i nätfrekvensen, dvs MW/Hz. Se också appendix A som behandlar Definitioner.

Reglerstyrkan behövs för att möta de tillfälliga belastningsvariationerna som ger upphov till avvikelse i nätfrekvensen från den nominella frekvensen på 50 Hz. Dessa tillfälliga belastningsvariationer kan ses som en stokastisk process. Vattenkraft, som har snabbare reglereregenskaper än värmekraft, är bäst lämpad att sköta denna automatiska frekvensreglering. Stora vattenkraftaggregat är det bästa verktyget för att ge den erforderliga reglerstyrkan och därmed klara reglerarbetet. Se appendix A som visar en skiss på ett vattenkraftaggregat och dess turbinreglering.

1.2 SYFTE

Det främsta syftet med detta examensarbete har varit att utröna om det finns möjlighet att öka reglerstyrkan i befintliga anläggningar utan att reglerarbetet ökar mer än den erhållna reglerstyrkan. En ökning av reglerarbetet ger en större förslitning av utrustningen och därigenom en högre underhållskostnad, vilket givetvis bör undvikas. Observera att reglerarbetet måste öka (ungefär) i proportion till reglerstyrkan, eftersom ett aggregat med höjd reglerstyrka naturligtvis också tar på sig mer reglerarbete. De konsumtionsvariationer som förekommer ändras inte för olika regulatorinställningar, utan mängden reglerarbete som måste utföras är ungefär konstant. Om sedan ett eller flera aggregat ska utföra reglerarbetet är en bedömningsfråga.

Fördelarna med en ökad reglerstyrka på ett antal vattenkraftaggregat är bl a följande.

- Kravet på reglerstyrka kan upprätthållas även under låglastperioden
- Antalet vattenkraftaggregat som behöver delta i frekvensregleringen kan minskas
- Kostnaden för att upprätthålla den anbefallna reglerstyrkan minskas genom att körning av maskiner på dålig verkningsgrad undviks

Om undersökningen gav ett positivt resultat skulle förslag ges till nya regulatorinställningar.

Dessutom undersöktes de inspelade frekvensvärdena som användes i simuleringen med avseende på statistiska egenskaper.

2. PROBLEMBESKRIVNING

Förutsättningarna för frekvensreglering beskrivs här. Avsnitt 2.1 presenterar regler och funktioner vad gäller den automatiska frekvensregleringen. Speciellt behandlas begreppet reglerstyrka ingående. Frekvensvärdena som använts vid simuleringarna diskuteras i avsnitt 2.2 och de aktuella regulatormodellerna redovisas i avsnitt 2.3. Vid simuleringarna har en förenklad modell av en vanligt förekommande turbinregulator använts. Främsta skälet för att använda en förenklad modell var att CPU-tiden förkortades vid simuleringarna med en faktor 10. Jämförelser mellan den ursprungliga komplexa modellen och den förenklade modellen visar god överensstämmelse.

2.1 AUTOMATISK FREKVENSSREGLERING

2.1.1 Bakgrund

Nätfrekvensen, eller egentligen nätfrekvensens ändringshastighet, är ett mått på balansen mellan produktion och konsumtion av elkraft och används därför som signal till turbinregulatorerna som i sin tur styr pådragen till turbinerna. Här följer en kort beskrivning av händelseförloppet vid en varierande belastning.

Ökar belastningen sjunker nätfrekvensen och turbinregulatorerna, som använder frekvensen som ärvärde, ökar pådraget och därmed producerad effekt tills att produktion och konsumtion av elkraft kommer i balans vid en något lägre frekvens än 50 Hz. På motsvarande sätt minskas automatiskt elkraftproduktionen vid en frekvensökning något över 50 Hz, p g a en belastningsminskning.

De stora belastningsförändringarna (exempelvis mellan natt och dag) regleras genom att aggregat startas och stoppas enligt i förväg uppgjord produktionsplan, medan de mindre förändringarna i lasten bär sig åt som en stokastisk process. Det är dessa mindre tillfälliga belastningsvariationer som den automatiska frekvensregleringen ska ta hand om.

NORDEL:s rekommendationer är att frekvensen ska hållas inom $50 \pm 0,1$ Hz vid normala driftförhållanden. Den automatiska frekvensregleringen ska grundas på ett glidande tvåminuters medelvärde för att undvika alltför ryckigt reglerarbete och ska sköta frekvensregleringen i intervallet $50 \pm 0,1$ Hz, dvs vid normala driftförhållanden. Detta innebär att störningsregleringen (exempelvis ett stort produktionsbortfall) sköts

delvis med andra åtgärder, såsom start av reservaggregat, lastfrånkoppling osv. Det är viktigt att se skillnaden mellan den automatiska frekvensregleringen vid normala driftförhållanden och störningsregleringen.

2.1.2 Regulator

Det är alltså turbinregulatorerna till vattenkraftaggregaten som verkställer den automatiska frekvensregleringen så länge nätfrekvensen ligger i intervallet $50 \pm 0,1$ Hz. Insignalen till turbinregulatorn är nätfrekvensen och utsignalen är läget för pådraget till turbinen. Pådraget motsvarar approximativt generator-effekten.

När det gäller snabba förändringar i nätfrekvensen, ett slags nätbrus, vill man inte försöka reglera detta. Det skulle bara ge onödigt reglerarbete. Dessutom motverkar den roterande massan i turbiner och generatorer alla hastiga frekvensändringar.

Med inställningarna för statik och dämpning bestämmer man karaktären (snabb, långsam, förstärkning osv) hos regulatorn. På turbinregulatorn ställer man också in börvärdet för producerad effekt, exempelvis 85 % av märkeffekt för att få bästa verkningsgrad.

2.1.3 Reglerstyrka

Storleken på aggregatets reglerstyrka bestäms av följande faktorer.

Förstärkningen och dämpningen i turbinregulatorn samt sambandet mellan pådrag och uteffekt.

Då effektändringen och frekvensavvikelsen betecknas med ΔP respektive Δf kan man generellt skriva:

$$R = \Delta P / \Delta f.$$

Observera att ΔP och Δf är medelvärde över en tidsperiod, exempelvis 120 s. Med denna formel kan ett aggregats reglerstyrka mätas genom att först registrera dess uteffekt och nätfrekvensen över en tidsrymd när aggregatet är i drift och sedan beräkna reglerstyrkan med ovanstående uttryck.

En mer beräkningsmässig formel som används i detta examensarbete:

$$R \text{ (MW/Hz)} = \frac{2 * P_{\text{märk}}}{b_{\text{tot}}(\%)}$$

där $P_{\text{märk}}$ är aggregatets märkeffekt i MW,
 $btot(\%)$ beror på bp , bt , Td (se def för statik
 och dämpning) samt hastigheten på frekvens-
 ändringen.

Då s betecknar Laplaceoperatorn kan $btot$ skrivas:

$$btot = \frac{bp + (bp + bt)sTd}{1 + sTd}$$

Med detta uttryck kan vi skriva reglerstyrkan som en
 överföringsfunktion:

$$R \text{ (MW/Hz)} = \frac{2 * P_{\text{märk}}}{100} * \frac{1}{bp} * \frac{1 + sTd}{1 + s \frac{bp + bt}{bp} Td}$$

Observera att R är en överföringsfunktion som beror på
 $s!$

Reglerstyrkan kan därför delas upp i en statisk del,
 R_{stat} , som reagerar på långsamma förändringar i nät-
 frekvensen och en transient del, R_{tran} , som reglerar de
 snabba förändringarna:

$$R_{\text{stat}} = \frac{2}{bp} \quad \text{resp} \quad R_{\text{tran}} = \frac{2}{bp + bt}$$

Ytterligare ett uttryck för reglerstyrkan som är ut-
 veckling av R_{stat} ovan (bp =statiken).

$$R_{\text{stat}} (\%P_{\text{märk}}/\text{Hz}) = \frac{200}{\text{statiken} (\%)}$$

Vid stora pådrag stämmer dock inte alltid effekt-
 ändringen med pådragsändringen och därför avtar regler-
 styrkan med ökat pådrag på vissa maskiner. I detta
 arbete tas emellertid ingen hänsyn till denna olinjäri-
 tet mellan pådrag och avgiven effekt.

Reglerstyrkan i ett kraftsystem bestående av ett fler-
 tal kraftaggregat definieras som summan av reglerstyr-
 korna i de samkörande aggregaten.

I detta examensarbete betraktas alla vattenkraft-
 aggregat i NORDEL-systemet som ett enda stort vatten-
 kraftaggregat. Enligt NORDEL:s rekommendationer ska
 reglerstyrkan i systemet ligga på 6 000 MW/Hz, som är
 fördelat beroende på förbrukningen i de deltagande

länderna. Baserat på 1981 års förbrukning blev fördelningen sålunda:

Danmark (Själland):	4,5 %	270 MW/Hz
Finland	17,4 %	1 050 MW/Hz
Norge	37,0 %	2 220 MW/Hz
Sverige	41,1 %	2 460 MW/Hz
TOTALT		6 000 MW/Hz

Detta kan jämföras med den maximala effektförbrukningen i Norden under 1981 som var ca 48 000 MW. Förutom denna reglerstyrka ska det finnas en frekvensregleringsreserv på 600 MW som aktiveras vid 50,0 Hz. Med andra ord ska det alltid finnas mer effekt att ge om nu frekvensen skulle sjunka under 50,0 Hz.

2.2 FREKVENSDATA

2.2.1 Uppmätning och beräkning av frekvensvärde

Frekvensvärdena, som har använts som insignal vid simuleringen, uppmättes på 130 kV-skenan i Glentegård, Danmark, under maj månad 1985. NORDEL-systemet låg på reducerad reglerstyrka (4 000 MW/Hz) under denna period. Helt slumpmässigt valdes en sammanhängande mätperiod av nätfrekvensen om 8,5 h för att användas för simuleringarna i detta arbete. Varje frekvensvärde är medelvärdet på frekvensen över två sekunder. Nätfrekvensen (FS) under den aktuella mätperioden på 8,5 timmar finns uppritad på sidan C17. Dessutom är frekvensen för de första 2,2 timmarna av mätperioden presenterad på samma sida, med kurvan för tvåminuters glidande medelvärde (FF2) inlagd.

Med en impulsgenerator och en pulsräknare uppmättes frekvensen. Man räknade antalet pulser över fem perioder av nätfrekvensen. Fem perioder av nätfrekvensen (50 Hz) tar i genomsnitt $5 \cdot 1/50 = 0,1$ s. Impulsgeneratorn gav $10 \cdot 2^{15}$ impulser/sekund, vilket ger i genomsnitt $2^{15} = 32\,768$ impulser för fem perioder. Under två sekunder får man ca 20 st delvärde, som används för beräkning av den genomsnittliga frekvensen under de två föregående sekunderna. På detta sätt undviks också eventuella snabbt övergående störningar och mätfel. Mätningen är alltså i sig själv ett slags lågpassfilter.

Det maximala felet på olika felkällor, såsom kvantiseringsfel uppskattas till $\pm 0,001$ Hz. Noggrannheten på frekvensvärdena är fullt tillfredsställande för användandet i simuleringen.

2.2.2 Statistiska aspekter på frekvensvärdena

Programpaketet IDPAC, framtagit av Institutionen för Reglerteknik, LTH, användes för att undersöka frekvensvärdena. Det gav bl a följande resultat för den aktuella mätserie på 15 232 värde som användes vid simuleringen.

Medelvärde = 49,9962 Hz
 Varians = 0,001 (Hz)²
 St avv = 0,039 Hz
 Min värde = 49,87 Hz
 Max värde = 50,10 Hz

Dessa 15 232 mätvärden motsvarar nätfrekvensen under ca 8,5 timmar.

Kommentar:

Standardavvikelsen är approximativt 1/3 av max frekvensavvikelse. De relativt stora avvikelserna från nominell frekvens som max/min-värdena visar beror på att inställd produktion avvikit för mycket från aktuell konsumtion.

2.3 MODELL FÖR TURBINREGULATOR

2.3.1 Modell kontra verklighet

Det ska här understrykas att för alla undersökningar som gjorts i detta examensarbete har jag använt simulering av regulatormodeller på dator. Något direkt prov ute på vattenkraftaggregat har alltså inte skett. En modell av t ex en turbinregulator kan aldrig helt kopiera sin verkliga föregångare, men de här använda modellerna ger åtminstone en bra grund för de teoretiska resonemang och slutsatser som presenteras i denna rapport.

2.3.2 Ursprunglig modell

Det är ASEA:s turbinregulator FRVV 103 som ligger till grund för vår regulatormodell. FRVV 103 introducerades på marknaden i slutet av 1960-talet och sitter i dag i bl a ett antal svenska vattenkraftstationer.

I den modell som representerar regulatorn används den relativa frekvensavvikelsen från den nominella frekvensen på 50 Hz som insignal. Utsignalen Y2 från regulatormodellen är överensstämmande med pådragsöppningen. Med återkoppling av läget för pådraget och dess hastighet fås en stabil reglering. Regulatorn är dock inte av PI-typ som ASEA påstår i sin brochyr över regulatorn (se Referenser). Den innehåller visserligen

en integrerande del, men ingen ren integrator och därför blir totalresultatet inte en PI-regulator.

Se vidare sidorna B1-B3, som presenterar blockschema med beteckningar, överföringsfunktion, pol-nollställediagram, Bodediagram samt inställningsmöjligheter för turbinregulator FRVV 103.

Det finns tre olika parametrar som kan justeras på regulatorn:

bp - permanent återföring
 bt - temporär återföring
 Td - tidskonstant för temporär återföring

Reglerstyrkan, utfört reglerarbete och stigtiden för regulatorn bestäms av kombinationen av dessa tre parametrar.

Överföringsfunktionen för hela turbinregulatorn med huvudservo är ganska komplicerad, se $G_{ber}(s)$ på sidan B2. Nackdelen med denna komplexa turbinmodell är, som nämnts tidigare, den stora spännvidden i tidskonstanter som ger lång CPU-tid vid simuleringarna.

2.3.3 Förenklad modell

På grund av de problem som uppstod vid simuleringar med den ursprungliga turbinregulatormodellen framtog en enklare modell med mindre spännvidd i tidskonstanterna. Den byggde på den approximativa överföringsfunktionen $G_1(s)$, sidan B3.

Den approximativa överföringsfunktionen för turbinregulatorn kan skrivas (utan huvudservo):

$$G_1(s) = \frac{1}{bp} * \frac{1 + sT_d}{1 + \frac{bp + bt}{bp} sT_d}$$

Lägg märke till att den minsta tidskonstanten, T_y , (0,02 s) är bortapproximerad. Se också appendix B, där räkningarna visas.

För extremvärde på s (dvs hastigheten på frekvensändringarna) antar G_1 följande värde.

$$G_1(s) = \frac{1}{bp} = KL \quad \text{då } s \rightarrow 0 ;$$

dvs statisk förstärkning.

$$G1(s) = \frac{1}{bp + bt} = KH \text{ då } s \rightarrow \infty ;$$

dvs transient förstärkning.

Med detta underlag konstruerades en förenklad regulatormodell som motsvarar den ursprungliga på alla viktiga punkter. Se sidorna B4-B6, som innehåller blockschema, överföringsfunktion, pol-nollställediagram, Bodediagram och inställningsmöjligheter. Överföringsfunktionen G2 för den förenklade turbinregulatormodellen är helt identisk med den approximerade överföringsfunktionen G1. Pol-nollställediagrammen i figur 2 och figur 6 visar att modellerna har samma dominerande pol och därmed samma stigtid, se figur 9.

Bodediagrammen för de två modellerna är också nära överensstämmande förutom i det högsta frekvensområdet. Se diagrammen C1-C12, där båda modellernas belopp och argument (basic respektive simplified model) är ritade. Skillnaden beror på det inbyggda LP-filtret i styrdonet i ursprungsmodellen, som har en tidskonstant (T_y) på 0,02 s och därför klipper bort de snabbaste frekvenserna. Problemen som kom vid simulering av ursprungsmodellen berodde just på denna lilla tidskonstant. I den approximativa överföringsfunktionen utelämnas alltså tidskonstanten T_y .

Dessutom förkortades CPU-tiden vid simuleringarna avsevärt med den nya modellen, varför den förenklade modellen användes genomgående vid simuleringarna.

Följande inställningar har provats i simuleringarna.

bp : 0,1, 0,04, 0,02, 0,01
 bp/Td : 0,24/5, 0,36/7, 0,6/10 (bt och Td kan inte ställas separat)

Dessutom har ytterligare tre inställningar provats som vi återkommer till senare.

2.3.4 Extra funktioner för utvärderingen

I den förenklade modellen har hjälpfunktioner lagts in. Bland annat transformeras den digitala insignalen (två sekunders frekvensvärde) över till en analog dito via ett LP-filter (tidskonstant: 2 s) för att undvika orealistiskt snabba förändringar i insignalen.

Utfört reglerarbete (MET), som är ett mått på hur mycket huvudservot har justerat pådraget i slag/timme, beräknas. (Se appendix A, Definitioner.)

Ideala utsignalen (Y2ID) beräknas med hjälp av ett tvåminuters glidande medelvärde på nätfrekvensen. (Se avsnittet 2.1.1, NORDEL:s rekommendation för automatisk frekvensreglering samt appendix A, Definitioner.)

Godhetstalen RHO och GAIN (se Definitioner) jämför den erhållna utsignalen Y2 med den ideala Y2ID.

För att kunna rita upp pådraget (effekten) mot frekvensavvikelsen filtrerades utsignalen Y2 och frekvensavvikelsen FE genom LP-filter med tidskonstant = 120 s. Filtreringen motsvarar en glidande medelvärdesbildning över två minuter (120 s) för att svara upp mot NORDEL:s krav på tvåminuters medelvärdesreglering. Lutningen på kurvan Y2LP(FELP) ger sedan uppmätt reglerstyrka $R_{mät}$.

3 GENOMFÖRANDE

I detta avsnitt beskrivs hur arbetet utfördes och vilka resultat som söktes. Avsnitt 3.1 behandlar vilka hjälpmedel som användes och idén som låg till grund för undersökningen. Simuleringsmetodiken visas i avsnitt 3.2.

3.1 ARBETSMETOD

Målet med arbetet var att försöka öka reglerstyrkan i ett vattenkraftaggregat utan att reglerarbetet växer för mycket.

"The black box" i sammanhanget var den förenklade turbinregulatormodellen med sina inställningsparametrar bp, bt och Td. Insignal till boxen utgjordes av nätfrekvensvärde för ca 8,5 timmar. Det intressanta var hur utsignalen och därmed reglerstyrkan skulle bära sig åt för olika inställningar på statik (bp) och dämpning (bt och Td). Med hjälp av överföringsfunktion, Bode-diagram och pol-nollställediagram kunde man förutse (gissa) resultatet av en parameterändring. Se vidare avsnitt 4.

Verktyget i denna undersökning var SIMNON, ett simuleringsprogram framtagit av Institutionen för Reglerteknik i Lund.

Originalidén var följande.

En minskad statik (bp) ger en höjd reglerstyrka men medför samtidigt en ökning av reglerarbetet. Ökas då dämpningen (bt och Td) kan reglerarbetet hållas kvar på en rimlig nivå.

Då statik och dämpning på regulatormodellen endast kan ställas på ett visst antal värde (på samma sätt som för turbinregulatorn FRVV 103), gällde det att prova (simulera) fram en optimal kombination av dessa parametrar. Under simuleringen registrerades och beräknades flera olika värden och tillstånd för att man senare skulle kunna bedöma olika regulatorinställningar.

Reglerstyrkan kan beräknas då förhållandet mellan frekvensändring och effektändring är känt, enligt $R = \Delta P / \Delta f$. Alltså uppmättes och lagrades pådragsläget (som är approximativt proportionellt mot effekten) för att sedan ritas med motsvarande frekvensvärde. Notera att både pådragsläget och frekvensvärdet är medelvärde över en tidsperiod. Lutningen på denna kurva ger sedan uppmätt reglerstyrka, $R_{mät}$.

När det gäller reglerarbetet är det svårare att ange ett specifikt uttryck. Genom att integrera absolutbeloppet av pådragshastigheten och sedan dividera med integrerad tid fås åtminstone en indikation av utfört reglerarbete. Multiplicerar man sedan med 3 600 fås antal slag per timme. Det går sedan att jämföra nivån på utfört reglerarbete för olika inställningar.

I appendix A, Definitioner, behandlas både reglerstyrka och reglerarbete.

3.2 SIMULERING

Simuleringspaketet SIMNON användes genomgående. Den förenklade turbinregulatormodellen användes beroende på det tidigare nämnda problemet med spännvidden i tidskonstanter. Efter inledande prov av algoritmer valdes Runge Kutta, RK, som hade kortare simuleringstid än den vanliga integrationsalgoritmen HAMPC i SIMNON. Inte heller RK-algoritmen var helt problemfri. Valet av inledande steglängd (time increment) avgjorde om simuleringen skulle lyckas eller inte.

I fortsättningen användes alltså RK-algoritmen med inledande steglängd = 1 s.

Simuleringen omfattade 15 232 frekvensvärden, dvs 30 464 s = ca 8,5 timmar.

Vid simuleringarna registerades följande värde.

FS	Insignalen i form av de samplade frekvensvärdena (tvåsekunders-värde)
FF2	Glidande tvåminuters medelvärde på signalen (frekvensen)
Y2	Utsignalen från regulatorn, proportionellt mot pådraget
Y2ID	Ideala utsignalen beräknad på FF2 (se Definitioner)
Y2LP	Medelvärde utsignal
FELP	Medelvärde frekvensavvikelse

Vid simuleringarna beräknades följande värde.

MET	Ett relativt mått på utfört reglerarbete per tidsperiod
RHO	Korrelationskoefficienten mellan Y2 och Y2ID
GAIN	Kvoten mellan Y2 och Y2ID

Vid simuleringarna plottades följande värde.

FS(t)	Nätfrekvensen
FF2(t)	Tvåminuters medelvärde av nätfrekvensen
Y2(t)	Utsignalen

Y2ID(t) Ideala utsignalen
Y2LP(FELP) Pådraget som funktion av frekvensavvikelsen. Anm: Lutningen på denna kurva ger reglerstyrkan $R_{mät}$.

4 RESULTAT

Här följer resultat och observationer av gjorda simuleringar. De erhållna diagrammen och tabellerna beskrivs i avsnitt 4.1. I avsnitt 4.2 visas hur regulatormodellen reagerade på olika parameterinställningar. I avsnitt 4.3 visas hur väl de olika regulatorinställningarna överensstämde med en ideal inställning, med hjälp av godhetstalen RHO och GAIN.

4.1 DIAGRAM OCH TABELLER

Diagram, tabeller och figurer som det hänvisas till nedan återfinns i appendix B och C.

Bodediagram, belopp och argument, för respektive regulatorinställning visas i diagrammen C1-C12. För att kunna jämföra den ursprungliga modellen med den förenklade modellen finns båda modellernas kurvor inlagda i diagrammen, betecknade med BASIC respektive SIMPLIFIED MODEL.

Nätfrekvensen (FS), tvåminuters medelvärde av nätfrekvensen (FF2), utsignalen (Y2), ideala utsignalen (Y2ID) samt Y2LP(FELP) finns ritade i diagrammen C18-C29. Rmät, uppmätt reglerstyrka, har beräknats ur kurvan Y2LP(FELP). Y2LP och FELP är båda tvåminuters medelvärde av utsignal respektive frekvensavvikelse.

Tabell 1, C33, innehåller en sammanställning av parameterinställningar och mätvärde för simuleringarna. I tabell 1 finns också tidskonstanten för den första brytpunkten för varje regulatorinställning angiven (se också asymptotiska Bodediagrammet i figur 7, B5). Den benämns i fortsättningen helt enkelt som tidskonstanten T och beror på bp, bt och Td (se figur 9, B6).

Notera att tidskonstanten T är inverterat proportionell mot regulatorns bandbredd.

4.2 OBSERVATIONER

Hur påverkar då inställningsparametrarna bp (statik) och bt/Td (dämpning) regulatorns karaktär?

Uttryck som används i resonemanget:

$$\text{Förstärkning} * \text{Bandbredd} = \text{ca konstant1} \quad (1)$$

$$\text{Bandbredd} * \text{Stigtid} = \text{ca konstant2} \quad (2)$$

Asymptotiska överföringsfunktionen:

$$G_2(s) = \frac{1}{b_p} * \frac{1 + sT_d}{1 + \frac{b_p + b_t}{b_p} sT_d} \quad (3)$$

$$\text{Tidskonstanten: } T = \frac{b_p + b_t}{b_p} T_d \quad (4)$$

$$\text{Reglerstyrkan: } R = 2 * G_2 \quad (\%P_{\text{märk}}/\text{Hz}) \quad (5)$$

Vi tittar först på vad som händer då b_p (statiken) varieras med konstant dämpning.

b_p minskas/ökas;

- 1 Utsignalens amplitud ökar/minskar (ex: C18-C21)
- 2 Regulatorns tidskonstant ökar/minskar (tabell 1, C33)
- 3 Regulatorns bandbredd minskar/ökar (ex: C13)
- 4 Statiska förstärkningen ökar/minskar (ex: C13)
- 5 Reglerarbetet MET ökar/minskar (tabell 1, C33)
- 6 Reglerstyrkan $R_{\text{mät}}$ ökar/minskar (tabell 1, C33)
- 7 Kvoten MET/ $R_{\text{mät}}$ minskar/ökar (tabell 1, C33)

Dessa observationer stämmer väl överens med de teoretiska uttrycken ovan, pol-nollställediagrammet i figur 6, asymptotiska Bodediagrammet i figur 7 samt tidskonstanten T i figur 9, appendix B.

Det känns också rätt att utfört reglerarbete ökar när statiska förstärkningen ökas (dvs b_p minskas). Men notabelt är att reglerarbetet inte ökar lika mycket som uppmätt reglerstyrka (se kvoten MET/ $R_{\text{mät}}$ i tabell 1) då förstärkningen ökar. Detta beror på att bandbredden minskar då förstärkningen ökar (1) och därmed utförs reglerarbete i huvudsak endast för långsamma frekvensändringar. I diagrammen C1, C2, C3, C4 och C13 ser man detta tydligt. Reglerstyrkan, $R_{\text{mät}}$, påverkas inte så mycket av denna bandbreddsminskning i systemet, p g a sin egen relativt smala bandbredd på $1/120 = \text{ca } 0,008$ rad/s. Först vid tidskonstanter (för regulatorn) över 120 s påverkas $R_{\text{mät}}$, som då börjar minska jämfört med R_{stat} , p g a minskad bandbredd, vilket kan ses i tabell 1.

Fasvridningen, dvs eftersläpningen mellan insignal och utsignal ökar då b_p minskas, se t ex argumentkurvorna

på sidorna C1-C4 samt uttrycken (2) och (4) ovan. Mellan fasvridningen och tidskonstanten finns ett direktsamband.

Då istället bt/Td , dvs dämpningen, varieras (bp konstant) fås resultatet nedan.

Dämpningen minskas/ökas;

- 1 Utsignalens amplitud ökar/minskar relativt lite (ex: C18, C22, C26)
- 2 Regulatorns tidskonstant minskar/ökar (tabell 1, C33)
- 3 Regulatorns bandbredd ökar/minskar (ex: C13)
- 4 Statiska förstärkningen påverkas inte (ex: C13)
- 5 Reglerarbetet MET ökar/minskar (tabell 1, C33)
- 6 Reglerstyrkan $R_{mät}$ ökar/minskar relativt lite (tabell 1, C33)
- 7 Kvoten $MET/R_{mät}$ ökar/minskar (tabell 1, C33)

Även här går praktik och teori ihop.

Lägg märke till att den statiska förstärkningen inte påverkas, medan däremot reglerarbetet och uppmätt reglerstyrka ökar då bt/Td minskas. Återigen är det bandbredden som spelar in - se asymptotiska Bodediagrammet, figur 8, och uttrycken (1), (3) och (5) ovan. Vill man således öka bandbredden kan det åstadkommas genom att minska bt/Td .

Dessutom ser man i argumentkurvorna C1, C5 och C9 hur fasvridningen (eftersläpningen) minskar vid minskad dämpning. Se också uttryck (4).

4.3 GODHETSTAL

För att jämföra den vid simuleringen erhållna utsignalen Y_2 med den ideala utsignalen Y_{2ID} finns även RHO och GAIN angivna i tabell 1. Vid god överensstämmelse ligger båda godhetstalen nära 1.

Enligt tabell 1 får vi "bäst värde" på RHO och GAIN (1 respektive 1) för regulatorinställningar som ger en tidskonstant kring 120 s. Den ideala utsignalen, Y_{2ID} , är just beräknad på ett glidande tvåminuters medelvärde (två minuter = 120 s) enligt NORDEL:s rekommendationer.

5. SLUTSATSER

Fungerade då originalidéen, dvs ökad reglerstyrka för ett rimligt reglerarbete genom att minska bp (statiken) och öka bt/Td (dämpningen)?

Innan svar ges på denna fråga ska ytterligare ett kriterium (som tidigare nämnts i förbifarten) läggas på den automatiska frekvensregleringen som regulatorn ska ombesörja:

NORDEL:s rekommendation att frekvensregleringen ska baseras på ett glidande tvåminuters medelvärde för nätfrekvensen.

Den ideala utsignalen, Y2ID, som beräknats i simuleringarna motsvarar just denna rekommendation. Regulatorn ska alltså ge en utsignal, Y2, som efterliknar den ideala Y2ID för att vi ska tillgodose NORDEL:s förslag till frekvensreglering.

På grund av denna extra förutsättning för frekvensreglering ser vi med hjälp av tabell 1 att originalidéen inte stämmer.

Istället för att öka dämpningen ska dämpningen minskas vid en höjning av reglerstyrkan just för att få en utsignal så lik den ideala som möjligt. Detta påstående förutsätter att man hela tiden försöker hålla tidskonstanten oförändrad, t ex 120 s (120 s = två minuter).

Exempelvis: Reglerstyrkan ska ökas till det dubbla
(se tabell 1, C33)

Ursprungliga inställningar: bp = 0,02, bt/Td = 0,36/7
Tidskonstant = 133 s
Rmät = 99 %/Hz
Kvoten MET/Rmät = 0,379

Nya inställningar: bp = 0,01, bt/Td = 0,24/5
Tidskonstant = 125 s
Rmät = 200 %/Hz
Kvoten MET/Rmät = 0,376

Detta lite oväntade resultat beror på att tidskonstanten och därmed bandbredden bestäms delvis av dämpningen (se uttryck (2) och (4) i avsnitt 4.2). Dessutom ska man ha i åtanke att reglerstyrkan är en överföringsfunktion. För att få en verklig reglerstyrka, och inte bara en stationär dito, måste tillräcklig bandbredd finnas på regulatorn. Notera också att kvoten reglerarbete/reglerstyrka, dvs MET/Rmät, ligger på nästan

oförändrad nivå, vilket innebär att kravet "rimligt reglerarbete" uppfylls på ett tillfredsställande sätt.

Slutsatsen blir att tre av de tolv provade regulatorinställningarna motsvarar de önskemål på en regulator för automatisk frekvensreglering vid normala driftförhållande som redovisades ovan. Enligt tabell 1, C33:

Sim nr 4: $bp = 0,01$, $bt/Td = 0,24/5$, $Rmät = 200 \%$,
 $T = 125 \text{ s}$

Sim nr 7: $bp = 0,02$, $bt/Td = 0,36/7$, $Rmät = 99 \%$,
 $T = 133 \text{ s}$

Sim nr 10: $bp = 0,04$, $bt/Td = 0,60/10$, $Rmät = 48 \%$,
 $T = 160 \text{ s}$

För dessa tre inställningarna kan man konstatera följande.

- Reglerstyrkan, $Rmät$, är approximativt lika hög som $Rstat$.
- Kvoten reglerarbete/reglerstyrka ($MET/Rmät$) är ungefär lika.
- Tidskonstanterna ligger i intervallet 125-160 s, dvs relativt nära tidskonstanten för den ideala regulatorn (120 s).
- RHO och $GAIN$ visar att god överensstämmelse råder med den ideala utsignalen.

Eftersom statiken (bp) kan justeras kontinuerligt kan man ställa statik och dämpning så att tidskonstanten blir 120 s för regulatorn. Naturligtvis begränsar precisionen i inställningen av bp möjligheten att få tidskonstanten exakt 120 s. Med detta krav på T föreslår jag därför följande regulatorinställningar (optimala inställningar).

1 $bp = 0,0104$, $bt/Td = 0,24/5$, $T = 120 \text{ s}$

2 $bp = 0,0223$, $bt/Td = 0,36/7$, $T = 120 \text{ s}$

3 $bp = 0,0545$, $bt/Td = 0,6/10$, $T = 120 \text{ s}$

Se Bodediagrammen C14-C16 samt simuleringsresultaten med ovanstående inställningar i diagrammen C30-C32 och tabell 1. Lägg märke till att uppmätt reglerstyrka, $Rmät$, och den statistiska reglerstyrkan $Rstat$ är nästan helt lika. RHO och $GAIN$ (båda ung 1) tyder på att utsignalen $Y2$ är mycket lik ideala utsignalen $Y2ID$.

Dessa inställningar gäller speciellt för de förutsättningar som har anförts tidigare. För andra typer av reglerarbete kan givetvis andra regulatorinställningar vara mer fördelaktiga.

Tilläggas kan att för mätningar av reglerstyrka ute i stationer bör samma teknik kunna användas som i detta examensarbete. Filtreringen ska då anpassas till regulatorns tidskonstant för att erhålla rena kurvor. I simuleringskurvorna på sidorna C18-C29 Y2LP(FELP) kan man se skillnaden mellan kurvor med eller utan rätt anpassad tidskonstant. En falsk "hystereskurva" uppträder då tidskonstanterna inte är matchade.

Reglerstyrkan, som framtas på detta sätt, torde vara det närmaste man kan komma till "verklig reglerstyrka", med tanke på NORDEL:s rekommendation om frekvensreglering baserat på tvåminuters medelvärde.

A. Definitioner, NORDEL-karta och exempel på regleranläggning för vattenkraftaggregat

Innehåll

A0	: Innehållsförteckning
A1 - A3	: Definitioner
A4	: NORDEL-karta
A5	: Exempel på regleranläggning för vattenkraftaggregat

DEFINITIONER (bokstavsordning)

DÄMPNING

För att undvika pendling i turbinregleringen finns det en dämpande återkoppling i regulatorn som förhindrar alltför stora och snabba pådrag.

Dämpningen påverkas av två parametrar:

- den temporära återföringen, bt
- dämpningens tidskonstant, Td

Någon dimension på dämpningen kan inte ges.

Värdet på dämpningen inverkar också på reglerstyrkan, genom att bandbredden och den transienta reglerstyrkan ändras vid förändringar i bt och Td . Se def för reglerstyrkan samt det asymptotiska Bodediagrammet i figur 6, appendix B.

FREKVENSAVVIKELSE

Avvikelsen i Hz (eller %) från den nominella på 50 Hz.

Maximalt tillåten avvikelse i NORDEL-systemet under normala driftförhållanden är $\pm 0,1$ Hz (0,2 %).

GODHETSTAL

RHO och GAIN i tabell 1, C33, är två olika mått på hur väl utsignalen $Y2$ från regulatorn överensstämmer med den ideala utsignalen $Y2ID$. RHO är den skattade korrelationskoefficienten mellan $Y2$ och $Y2ID$. Då $RHO = ca 1$ finns ett exakt linjärt beroende mellan $Y2$ och $Y2ID$, dvs signalerna är lika. GAIN visar vilken av signalerna som är störst. Om $GAIN > 1$ så är $Y2 > Y2ID$ och om $GAIN < 1$ är $Y2ID > Y2$. Därför är signalerna lika starka då $GAIN = ca 1$.

RHO och GAIN är alltså ett slags godhetstal på utsignalen jämfört med den ideala utsignalen.

IDEAL UTSIGNAL

Utsignalen från en regulator som baserar regleringen på tvåminuters glidande medelvärde på nätfrekvensen enligt NORDEL:s rekommendationer. Den betecknas med $Y2ID$ i denna rapport.

REGLERARBETE

Ett mått på hur mycket turbinregulatorn har reglerat.

Det mest rättvisande värdet för ett verkligt system fås (antagligen) om den absoluta gångvägen för kolven på huvudservomotorn summeras över en tidsperiod. Ett mer lättåtkomligt värde vid simulering av en regulatormodell är att integrera absolutvärdet av derivatan på utsignalen (DY2) som motsvarar huvudservomotorns hastighet.

I fortsättningen anges alltså utfört reglerarbete med:

$$MET = 3\ 600 * 1/t * \int \text{abs}(DY2) dt.$$

Dimensionen på MET är slag/timme. Ett slag/timme innebär att kolven från huvudservomotorn har i medeltal en total gånglängd på ett helt kolvslag per timme. Detta mått ger oss möjlighet att jämföra utfört reglerarbete vid olika regulatorinställningar.

REGLERSTYRKA

Den effektändring som ett elkraftproducerande aggregat svarar med vid en frekvensavvikelse på nätet.

Reglerstyrkan betecknas med R och uttrycks i MW/Hz, %Pmärk/Hz eller %effektändring/%frekvensavvikelse (p.u. / p.u.). När reglerstyrkan anges med ett tal förutsätts att det gäller den statiska reglerstyrkan.

STATIK

Den direkta återföringen i regulatorn som inverterat är proportionell mot den statiska förstärkningen (Rstat). En annan benämning på statik är permanent återföring, bp.

Statiken uttrycks oftast i %, då man avser den procentuella avvikelsen från nominell frekvens som skulle erfordras för att få en effektändring motsvarande aggregatets märkeffekt. Minskas statiken, ökar alltså förstärkningen i regulatorn och därmed reglerstyrkan (Rstat). Värdet på statiken visar förhållandet mellan en eventuell bestående frekvensavvikelse och påföljande effektändring.

TIDSAVVIKELSE

Ett mått i sekunder på den integrerade frekvensavvikelsen. En direkt följd av en frekvensavvikelse är att ett elektriskt synkronur, drivet av nätfrekvensen, visar fel tid.

Då tidsavvikelsen betecknas med t och frekvensavvikelsen med f kan man generellt skriva:

$$t \doteq 1/50 * \int f(t) dt.$$

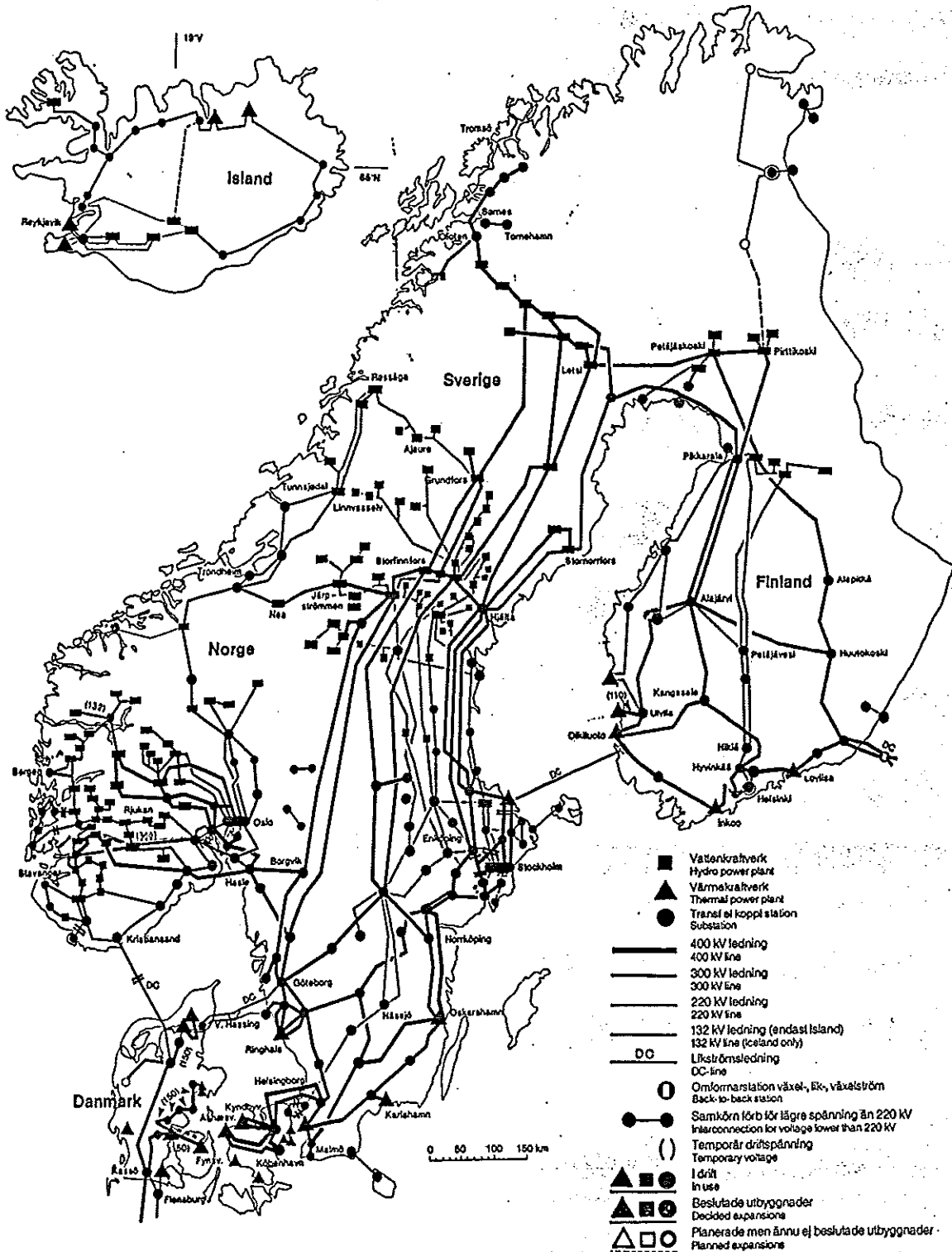
Om exempelvis nätfrekvensen ligger konstant på 49,9 Hz ($f = 0,1$ Hz) under en timme, får vi:

$$t = 1/50 * 3\ 600\ s * 0,1 \doteq 7,2\ s.$$

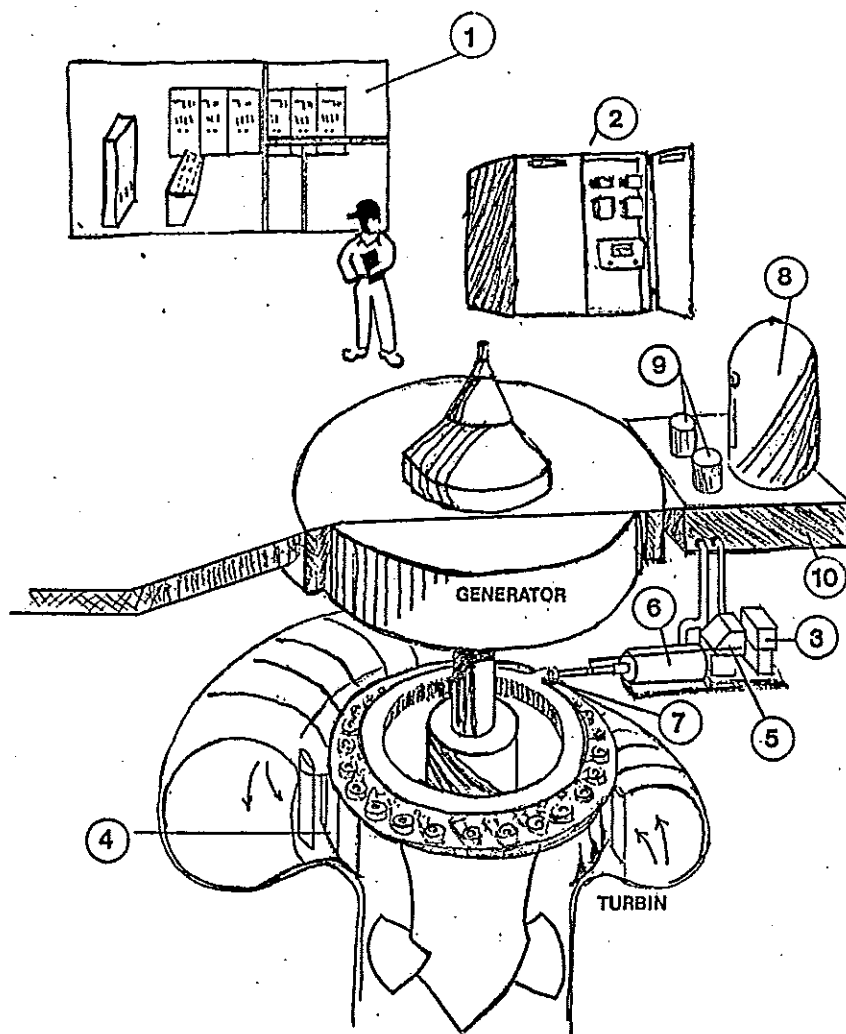
Synkronuret skulle saktat sig med 7,2 s. För att kompensera denna tidsavvikelse kan man öka frekvensen till 50,50 Hz (konstant) under två timmar för att synkronuret åter ska visa rätt tid.

NORDEL har rekommenderat en maximal tidsavvikelse på ± 10 s.

Fig S5. Nordels högspänningsnät
The Nordel main grid



NORDEL-systemet. (Hämtad ur NORDELs årsberättelse 1985.)



Exempel på elhydraulisk regleranläggning för ett vattenkraftaggregat.

I kontrollrummet (1) inställes och avläses alla reglervärde såsom effekt, frekvens osv. De elektriska styrsignalerna leds till regulatorskåpet (2), där de blandas, förstärks samt får passera genom dynamiska behandlingsnät. Signalerna skickas sedan till styrverket (3) som styrorder för ledskovlarna (4).

Räknat från styrverket övergår styrningen till att bli mekanisk-hydraulisk.

Utgångsdonets läge på styrverket bestämmer ledskovelöppningen eller pådraget. På grund av att ledskovlarnas omställning kräver stor kraft finns ett förstärkningssteg bestående av en styrventil (styrservo) (5) och en ledkransservomotor (huvudservo) (6) mellan styrverk/pådragsring (7), som överför ledkransservomotorns rörelse till samtliga ledskovlar.

Den för styrningen erforderliga energin tas från ett tryckoljeaggregat bestående av tryckklocka (8), pumpar (9) samt olja-behållare (10).

B. Blockschema och beteckningar för turbinregulatormodeller

Innehåll

- B0 : Innehållsförteckning
- B1 - B3 : Turbinregulator FRVV 103 - ursprunglig modell
- B4 - B6 : Turbinregulator - förenklad modell

Turbinregulator FRVV 103

1. Blockschema

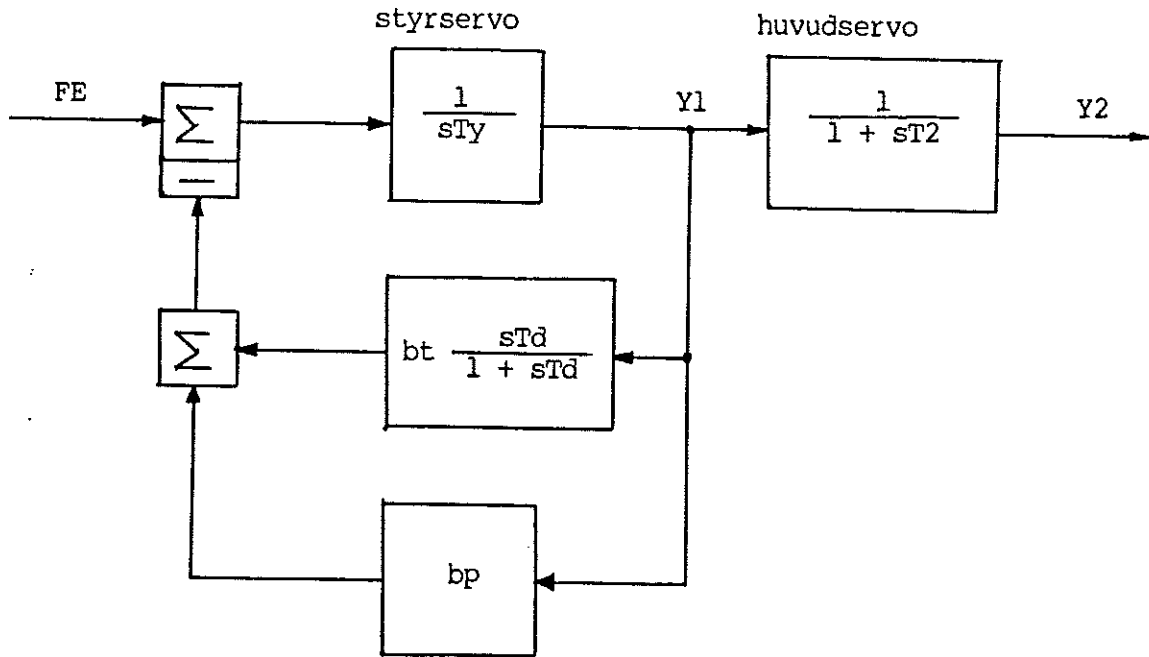


Fig 1. Blockschema turbinregulator FRVV 103

2. Beteckningar:

FE : relativ frekvensavvikelse

bp : permanent återföring (statik)

bt : temporär återföring

Td : temporära återföringens tidskonstant, s

Ty : styrservomotorns brantetid (tidskonstant=0.02), s

T2 : huvudservomotorns brantetid (tidskonstant=0.2), s

Y1 : styrservomotorläge (min=0, max=1)

Y2 : huvudservomotorläge (min=0, max=1)

3. Inställningsmöjligheter: (valda för simuleringarna)

bp: 0.1, 0.04, 0.02, 0.01

bt/Td: 0.24/5, 0.36/7, 0.60/10

Anm: bt och Td kan ej ställas separat.

Turbinregulator FRV 103

4. Överföringsfunktion beräknad från blockschemat (utan huvudservo)

$$G_{\text{ber}}(s) = \frac{1}{b_p} * \frac{1 + sT_d}{1 + sT_u} * \frac{1}{1 + sT_v}$$

$$\text{där } T_z = \frac{T_y T_d}{T_y + T_d(b_p + b_t)}$$

$$1/T_u \text{ resp. } 1/T_v = -\frac{1}{2T_z} \pm \text{resp. } -\sqrt{\left(\frac{1}{2T_z}\right)^2 - \frac{b_p}{T_y T_d}}$$

Överföringsfunktionen enligt ASEA (utan huvudservo)

$$G_{\text{ASEA}}(s) = \frac{1}{b_p} * \frac{1 + sT_d}{1 + s \frac{b_p + b_t}{b_p} T_d} * \frac{1}{1 + s \frac{T_y}{b_p + b_t}}$$

Anm: Numeriskt är uttrycken approximativt lika.

I detta arbete används G_{ber} .

5. Pol-nollställe diagram

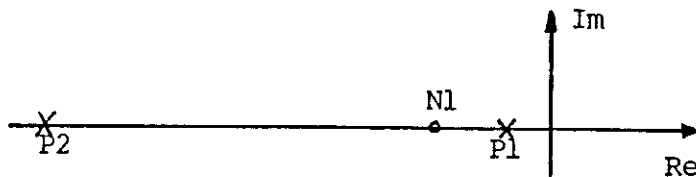
$$\text{Nollställe: } N1 = -\frac{1}{T_d}$$

$$\text{Poler: } P1 = -\frac{1}{T_u}, \quad P2 = -\frac{1}{T_v}$$

Med inställningen $b_p=0.1$, $b_t=0.36$, $T_d=7$ ($T_y=0.02$ konst.) fås följande värde:

$$N1 = -0.143$$

$$P1 = -0.031, \quad P2 = -23.1$$



Anm: Pol P1 är den dominerande polen.

Fig 2. Pol-nollställe diagram för turbinregulator FRV 103

Turbinregulator FRVV 103

6. Asymptotiskt Bodediagram

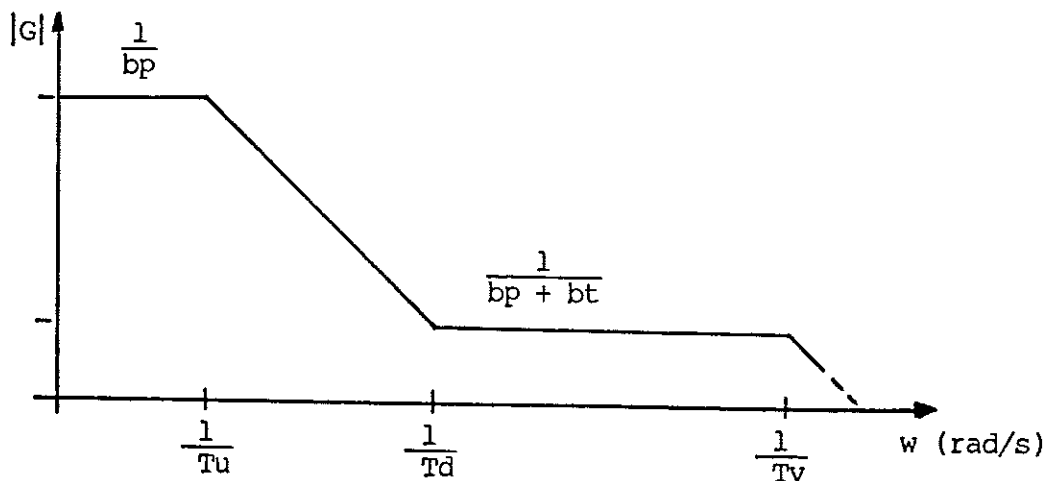
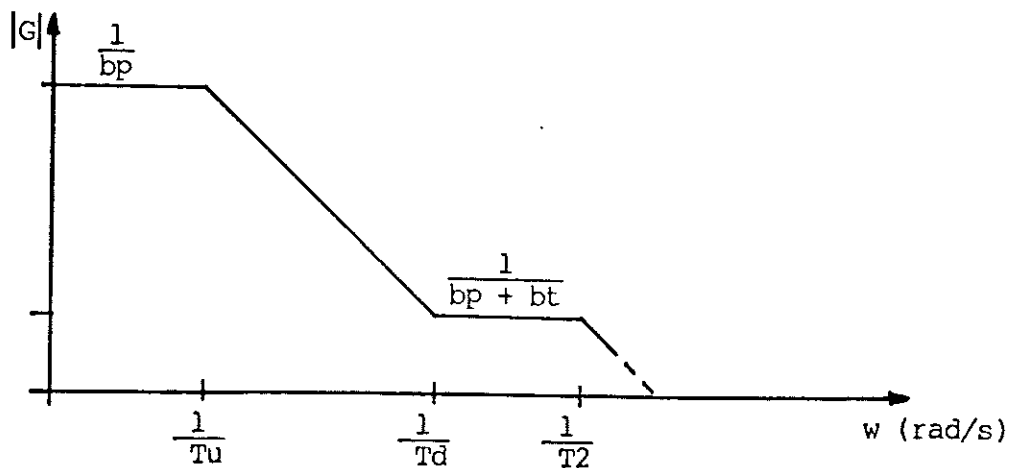


Fig 3. Asymptotiskt Bodediagram turbinregulator FRVV 103

7. Approximerad överföringsfunktion (med huvudservo)

Eftersom $T_y = 0.02$ s, dvs relativt liten jämfört med de andra tidskonstanterna, kan man erhålla en approximerad överföringsfunktion. Låter man faktorn som representerar huvudservon också vara med fås följande uttryck:

$$G_1(s) = \frac{1}{b_p} * \frac{1 + sT_d}{1 + s \frac{b_p + b_t}{b_p} T_d} * \frac{1}{1 + sT_2}$$

8. Asymptotiskt Bodediagram (med huvudservo) för $G_1(s)$ Fig 4. Asymptotiskt Bodediagram (med huvudservo) för den approximerade överföringsfunktionen G_1

Förenklad modell för turbinregulator

1. Blockschema

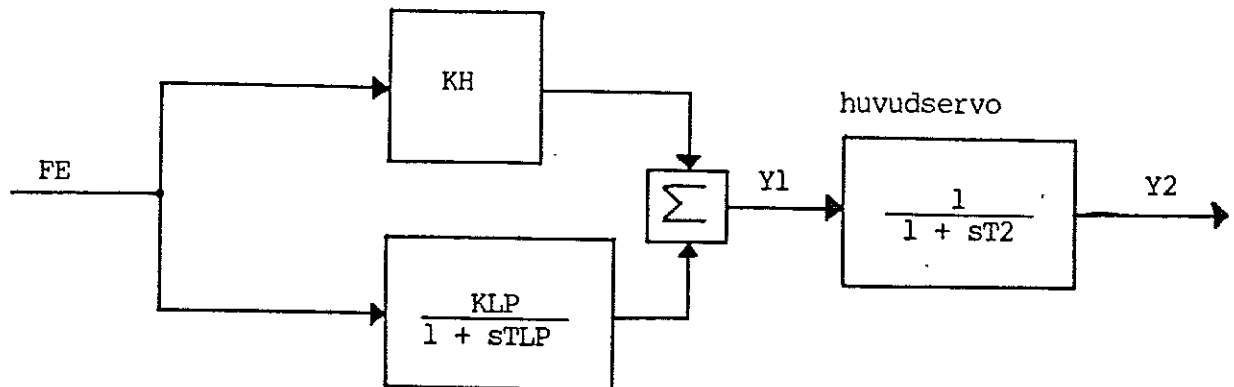


Fig 5. Blockschema förenklad modell för turbinregulator

2. Beteckningar:

$$KL : \frac{1}{bp} \quad (\text{statisk förstärkning})$$

$$KH : \frac{1}{bp + bt} \quad (\text{transient förstärkning})$$

$$KLP = KL - KH$$

$$TLP = \frac{bp + bt}{bp} Td$$

Se för övrigt beteckningarna för turbinregulator FRV 103.

3. Inställningsmöjligheter: (valda för simuleringarna)

$$bp: 0.1, 0.04, 0.02, 0.01$$

$$bt/Td: 0.24/5, 0.36/7, 0.60/10$$

Anm: bt och Td kan ej ställas separat.

Inställningsmöjligheterna är samma som för turbinregulatorn.

Förenklad modell för turbinregulator

4. Överföringsfunktion (utan huvudservo)

$$G_2(s) = KH + \frac{KLP}{1 + sTLP} = \dots = \frac{1}{bp} * \frac{1 + sT_d}{1 + s \frac{bp + bt}{bp} T_d}$$

Observera att G_2 är identisk med den approximativa överföringsfunktionen G_1 för turbinregulator FRVV 103.

5. Pol-nollställe diagram

$$\text{Nollställe: } N1 = - \frac{1}{T_d}$$

$$\text{Poler: } P1 = - \frac{1}{\frac{bp + bt}{bp} T_d}$$

Med inställningen $bp=0.1$, $bt=0.36$, $T_d=7$ fås följande värde:

$$N1 = - 0.143$$

$$P1 = - 0.031$$

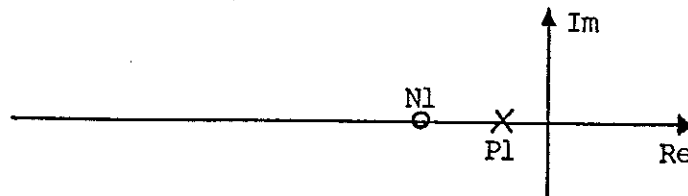


Fig 6. Pol-nollställediagram förenklad modell för turbinregulator

6. Asymptotiskt Bodediagram

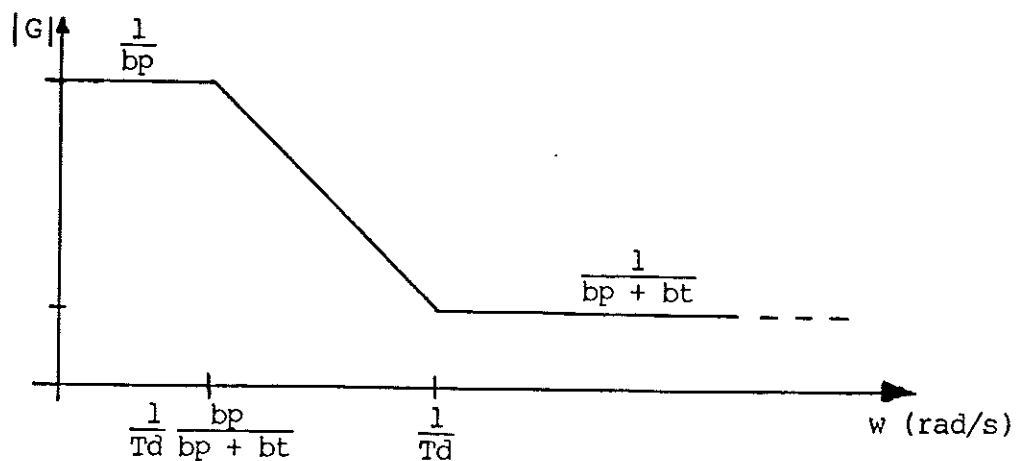


Fig 7. Asymptotiskt Bodediagram förenklad modell för turbinregulator

Förenklad modell för turbinregulator

7. Asymptotiskt Bodediagram (med huvudservo)

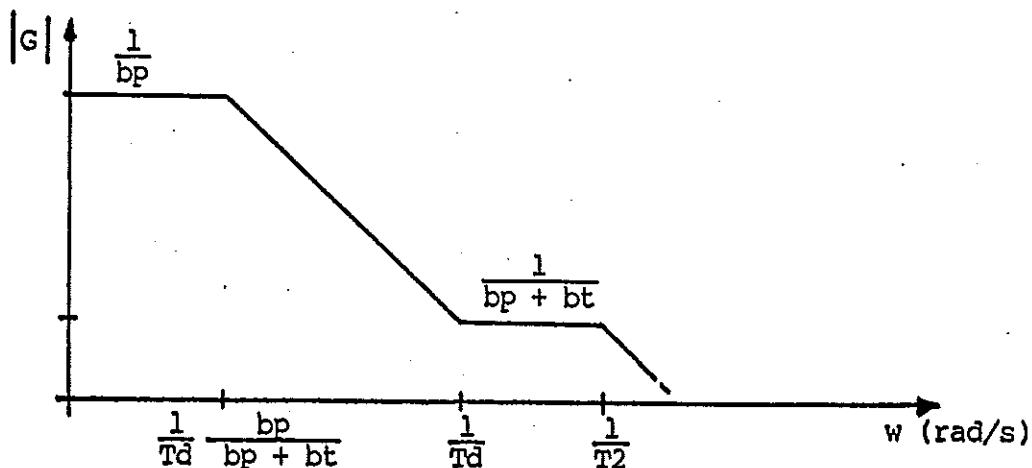


Fig 8. Asymptotiskt Bodediagram förenklad modell för turbinregulator (med huvudservo)

8. Tidskonstanten T

Tidskonstanten som bestämmer karaktären på den förenklade turbinregulatormodellen kan skrivas:

$$T = \frac{b_p + b_t}{b_p} T_d \quad (s) .$$

Samband med polen P1 (se pol-nollställediagrammet) :

$$T = \left| \frac{1}{P_1} \right| .$$

Vid stegsvar, tex om effektbörvärdet ändras ett steg, avgör tidskonstanten T approximativt stigtiden enligt en exponentialfunktion i tidsplanet:

$$y_2(t) = y_2(0) + y_{2\text{steg}} (1 - e^{-t/T}) , \text{ där } y_2(t) \text{ är läget för pådraget.}$$

Om $y_2(0) = 0$ och $y_{2\text{steg}} = 1$ blir stegsvaret ungefär som figuren neda (språngvisa förändringar bortses från)

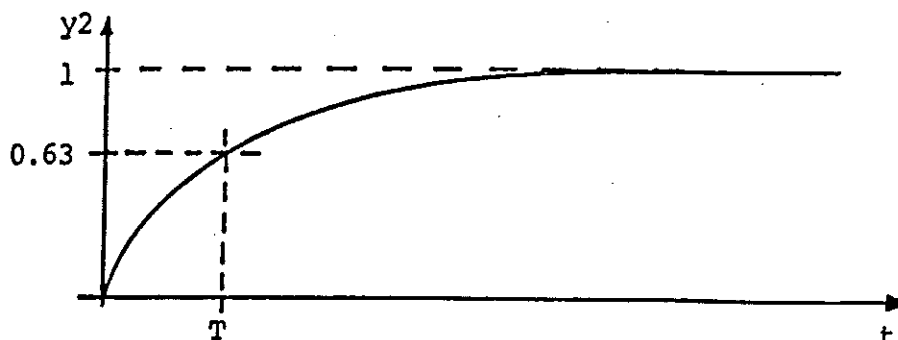


Fig 9. Tidskonstanten förenklad modell

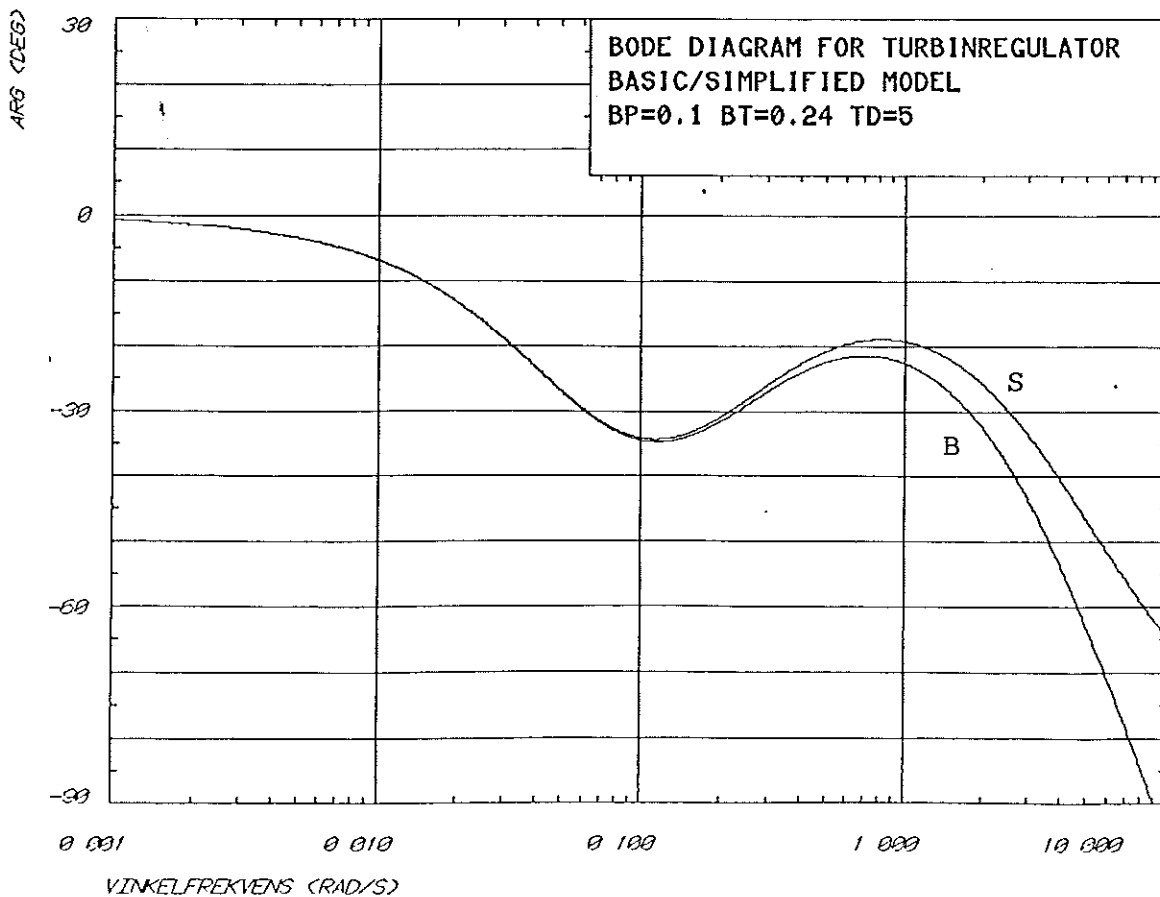
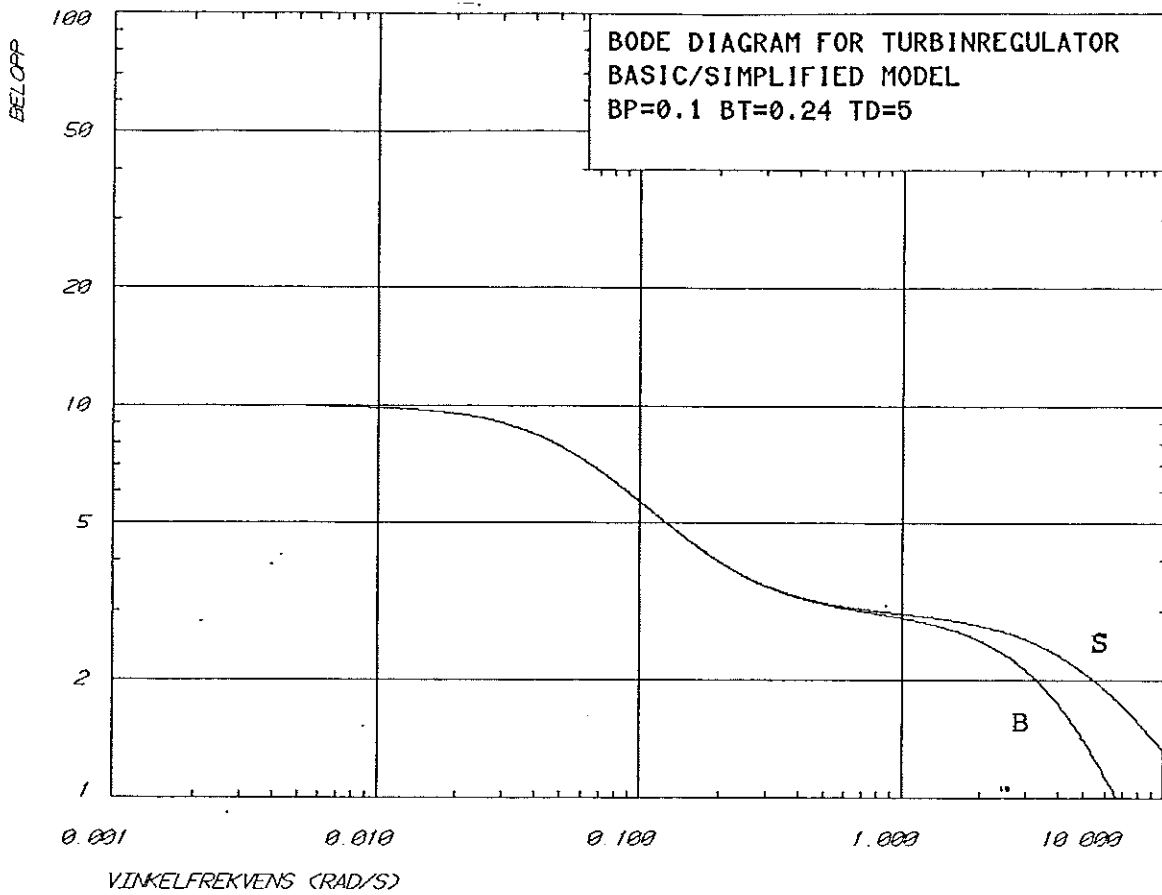
C. Diagram, simuleringskurvor och tabell

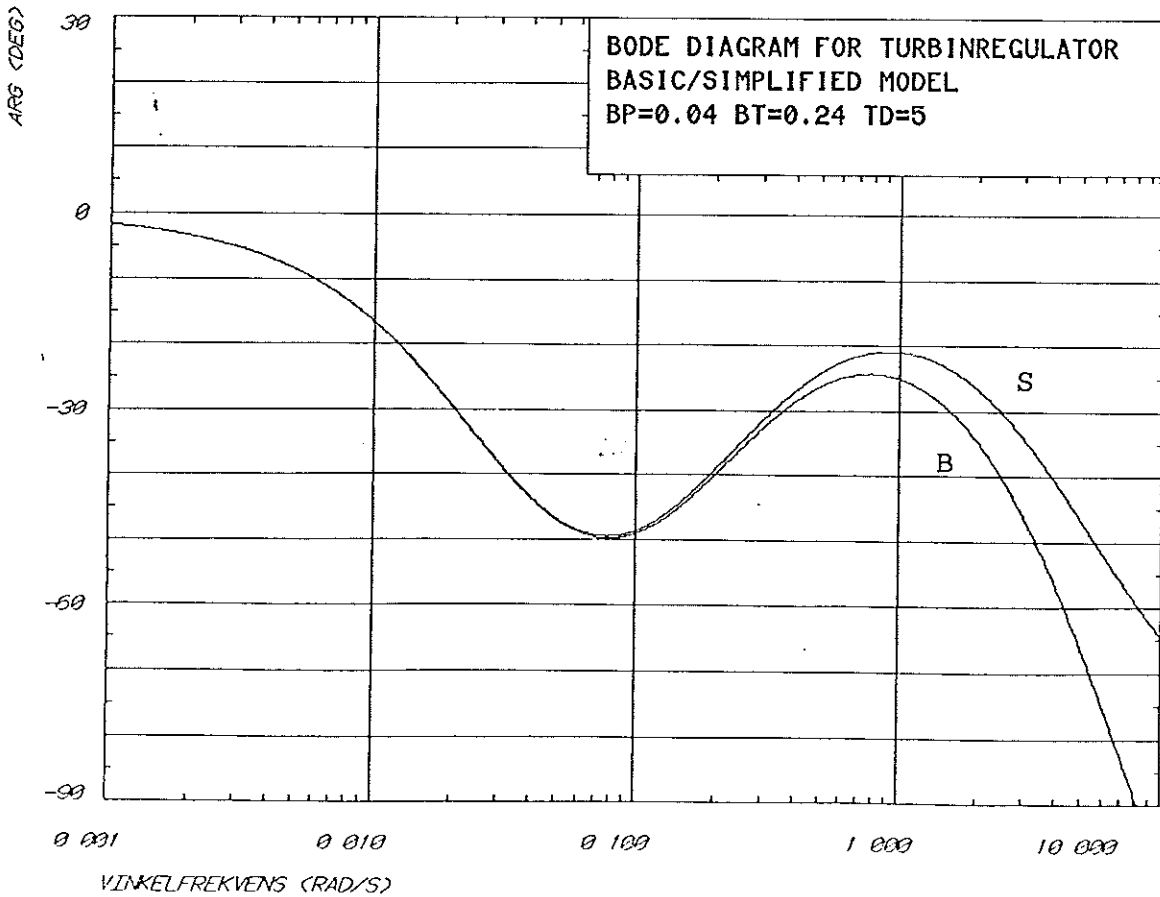
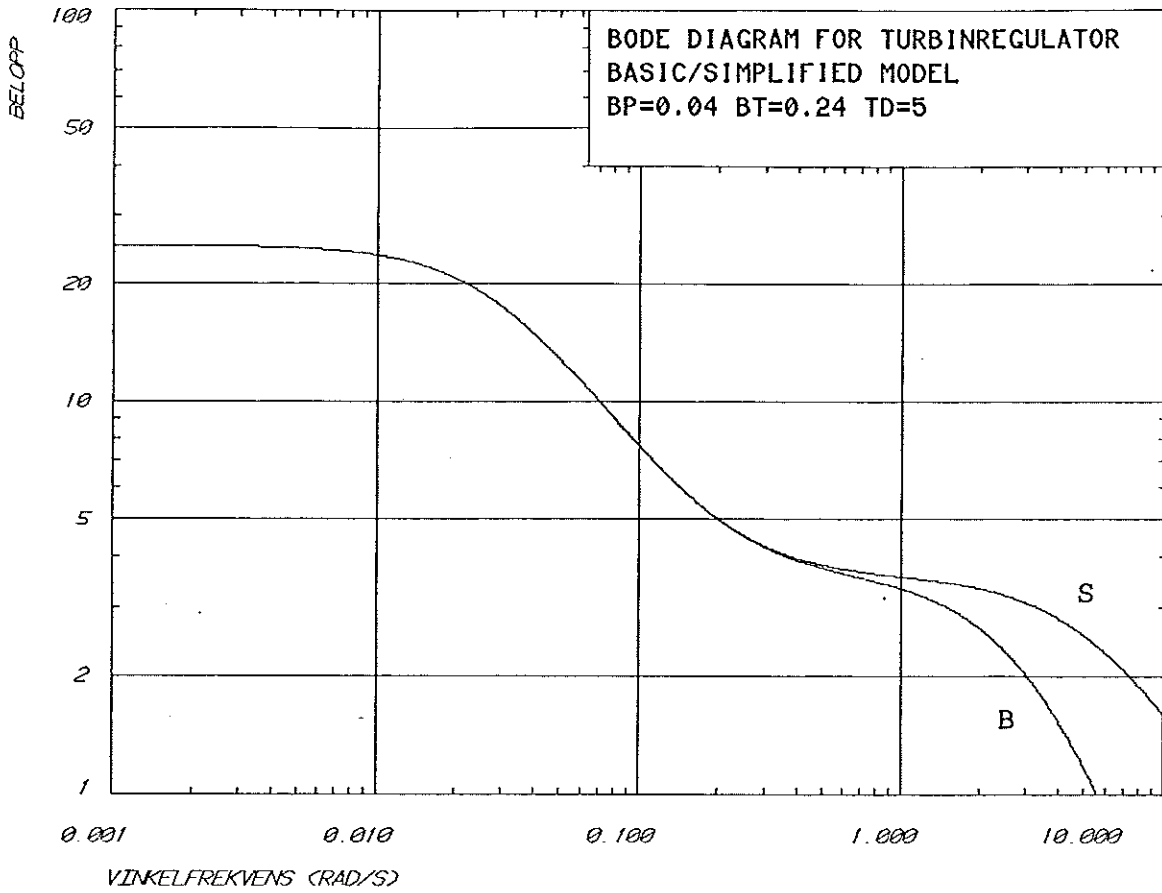
Innehåll

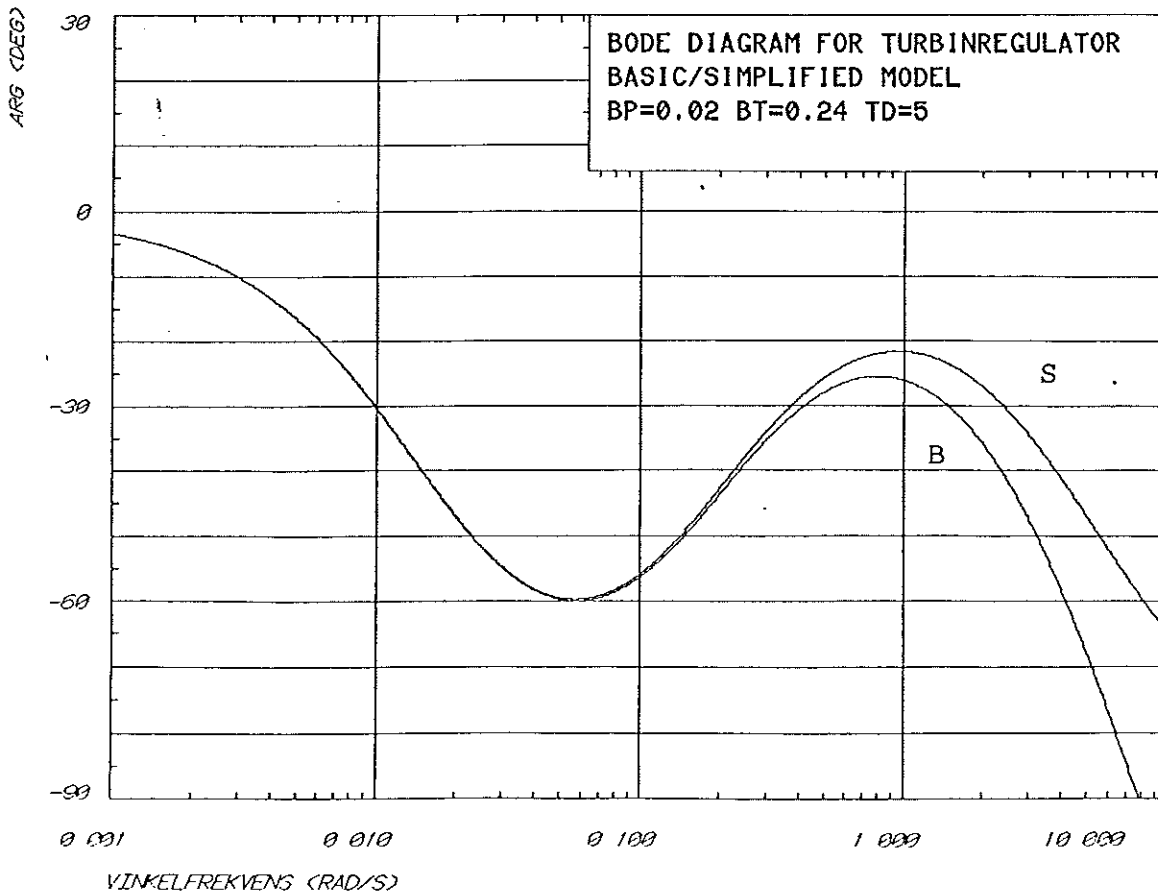
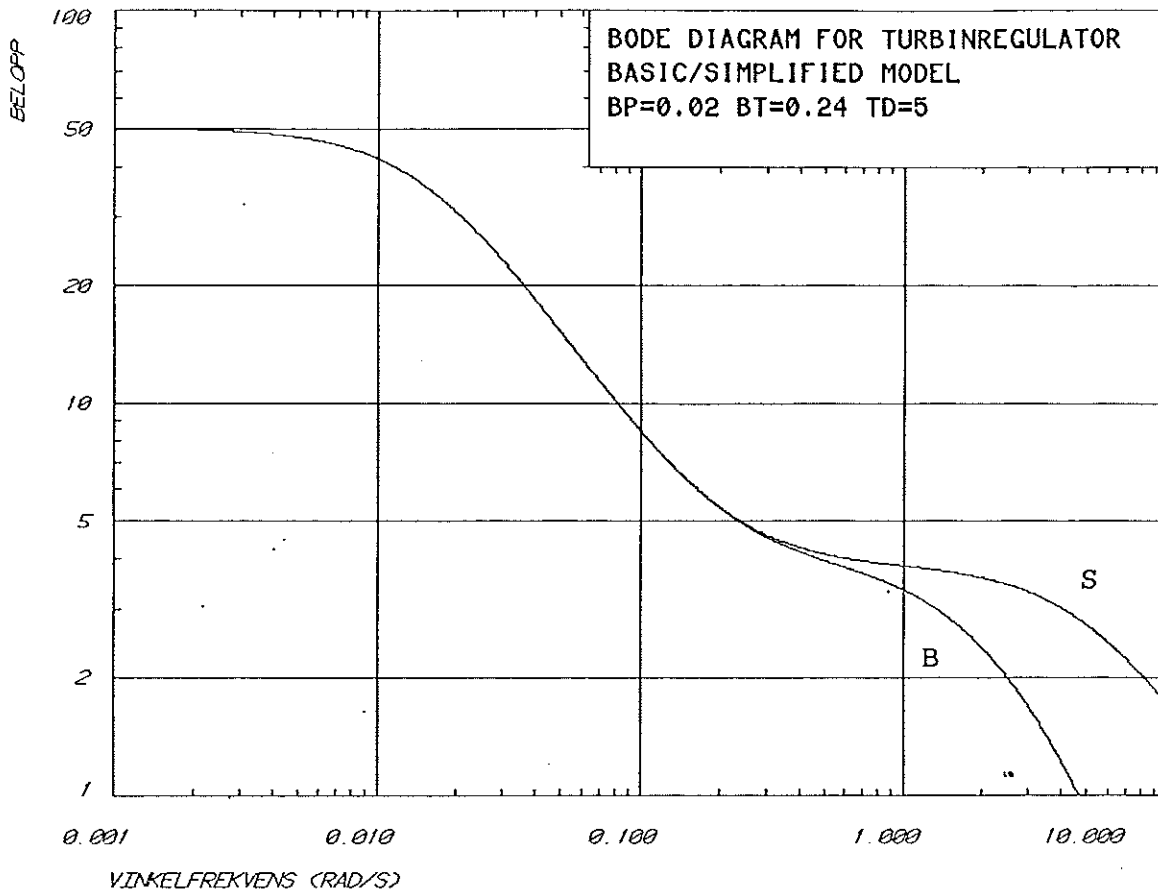
C0	: Innehållsförteckning
C1 - C12	: Bodediagram belopp/argument (grundinställning)
C13	: Bodediagram belopp, jämförande diagram för varierande dämpning resp. statik (grundinställning)
C14 - C16	: Bodediagram belopp/argument (optimal inställning)
C17	: Nätfrekvensen FS som användes som indata vid simuleringarna; dels hela mätperioden 8.5 h, dels de första 2.2 h av mätperioden som också innehåller 2-minuters glidande medelvärde FF2
C18 - C29	: Simuleringskurvor FS, FF2, Y2, Y2ID, Y2LP(FELP) för grundinställningar
C30 - C32	: Simuleringskurvor FS, FF2, Y2, Y2ID, Y2LP(FELP) för optimala inställningar
C33	: Tabell 1, Simuleringsresultat

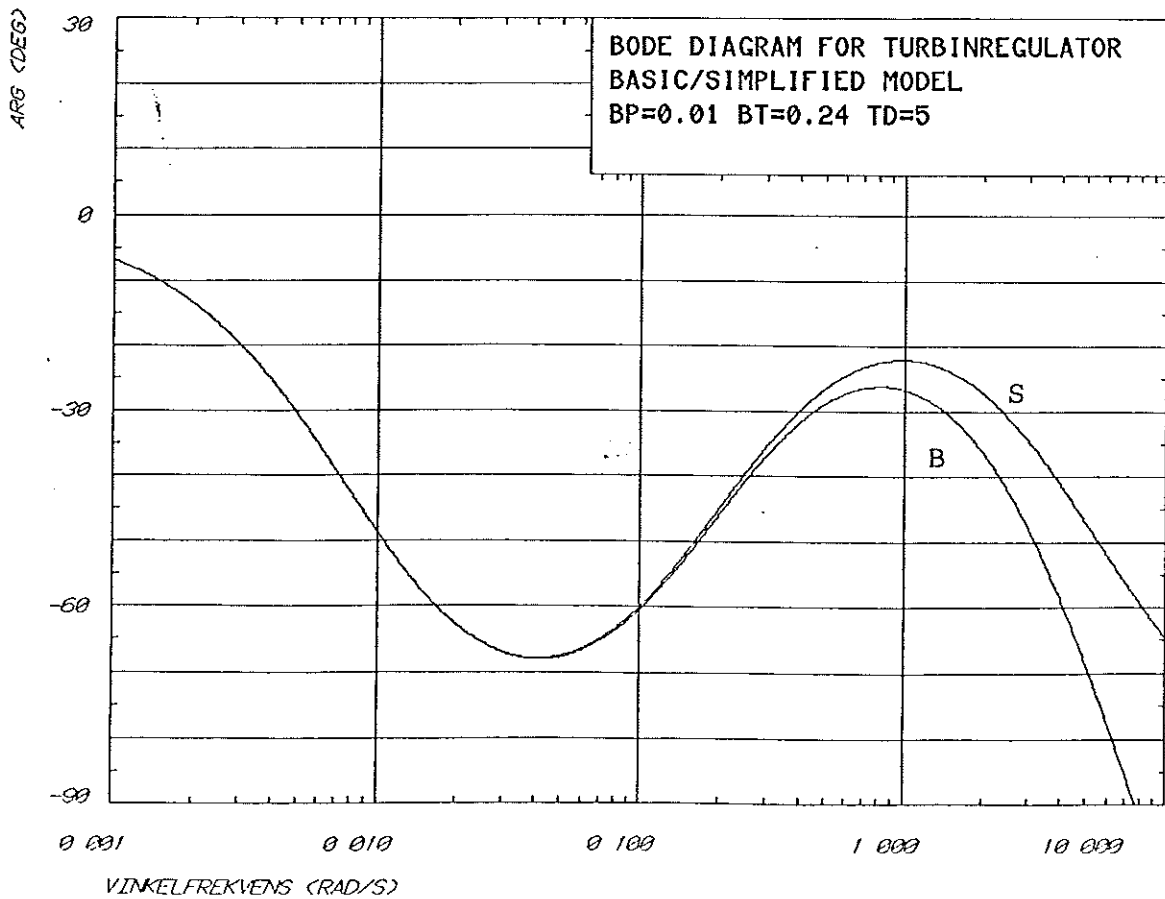
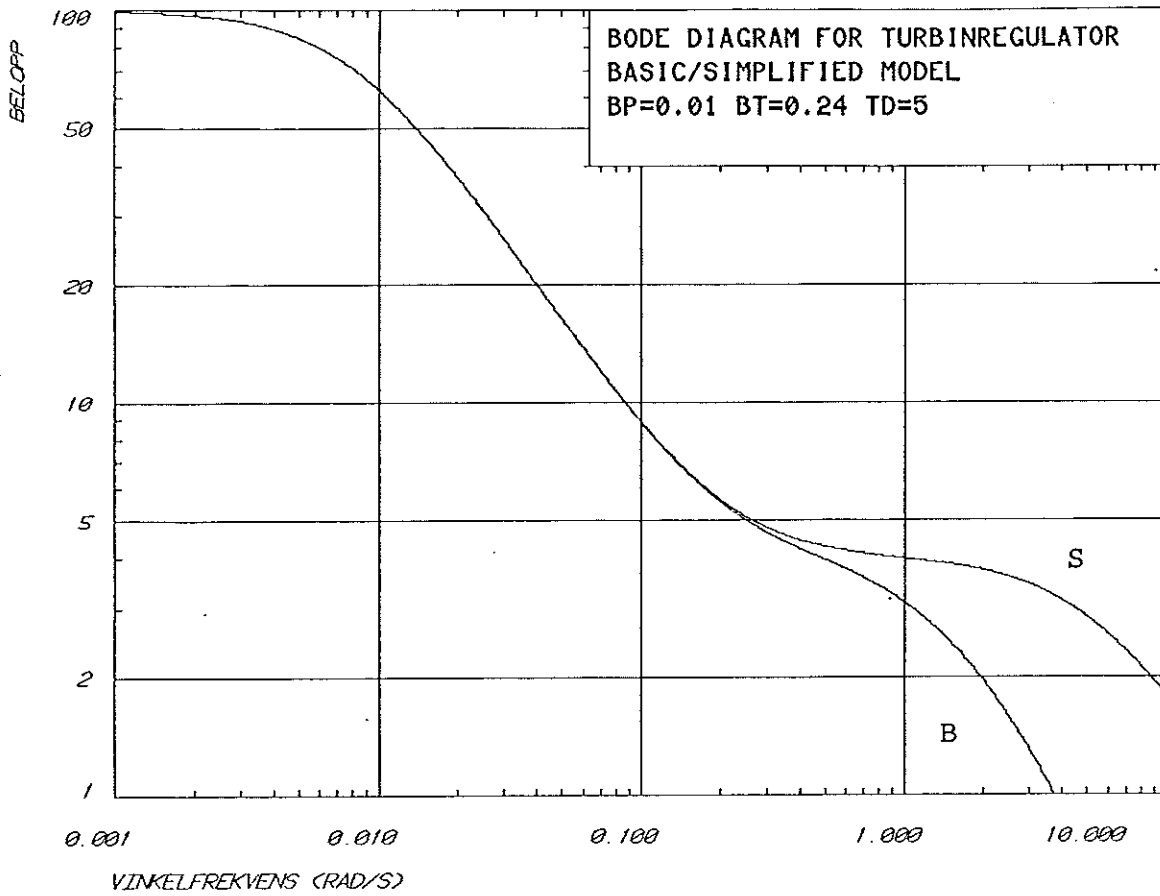
- Anm:
- 1) Basic/simplified model innebär ursprunglig resp. förenklad turbinregulatormodell (med huvudservo). Anges i diagrammen med B resp. S.
 - 2) Grundinställning innebär någon av de 12 inställningar av regulatorn som valdes för simuleringarna.
 - 3) Optimal inställning innebär någon av de 3 regulatorinställningar som beräknades med NORDELS rekommendation för frekvensreglering (baserat på 2-min. frekvensmedelvärde) som grund.
 - 4) Simuleringskurvorna har följande dimensioner på axlarna:

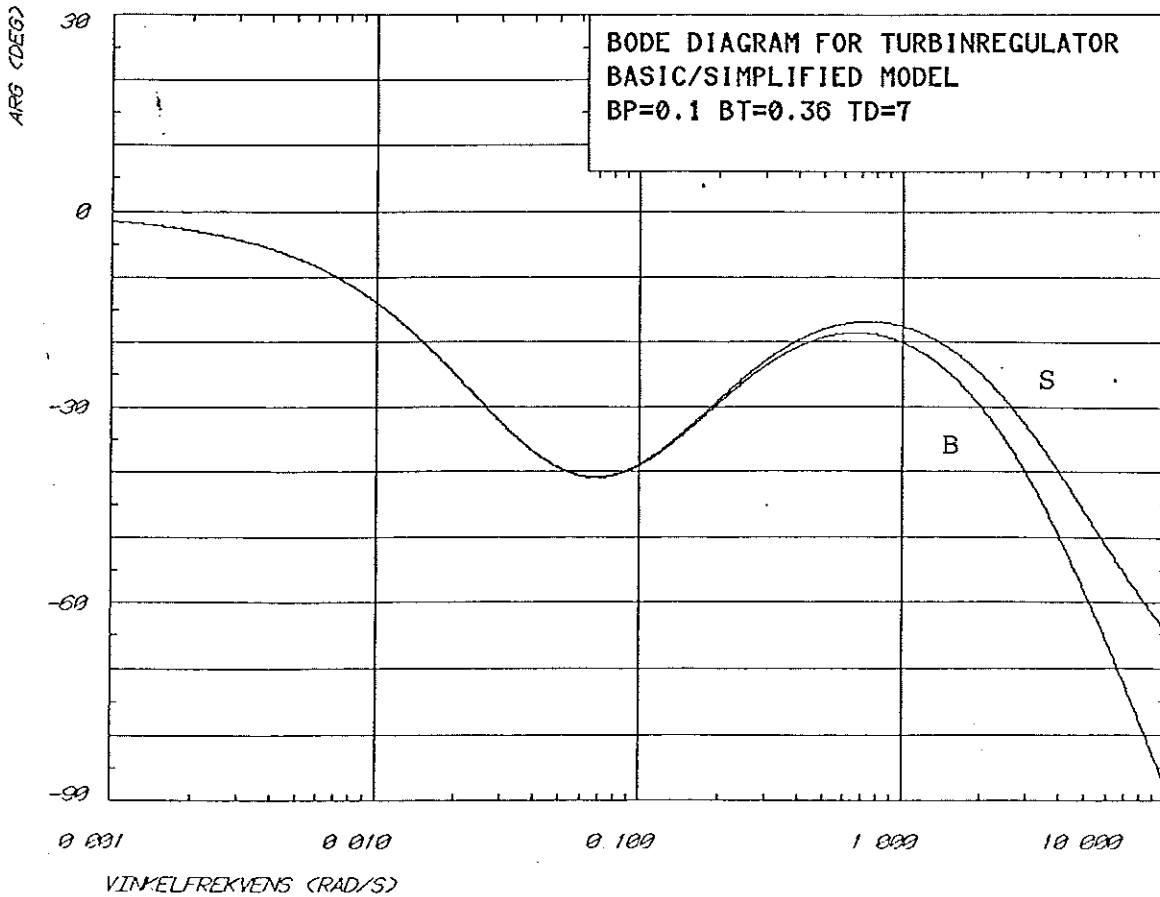
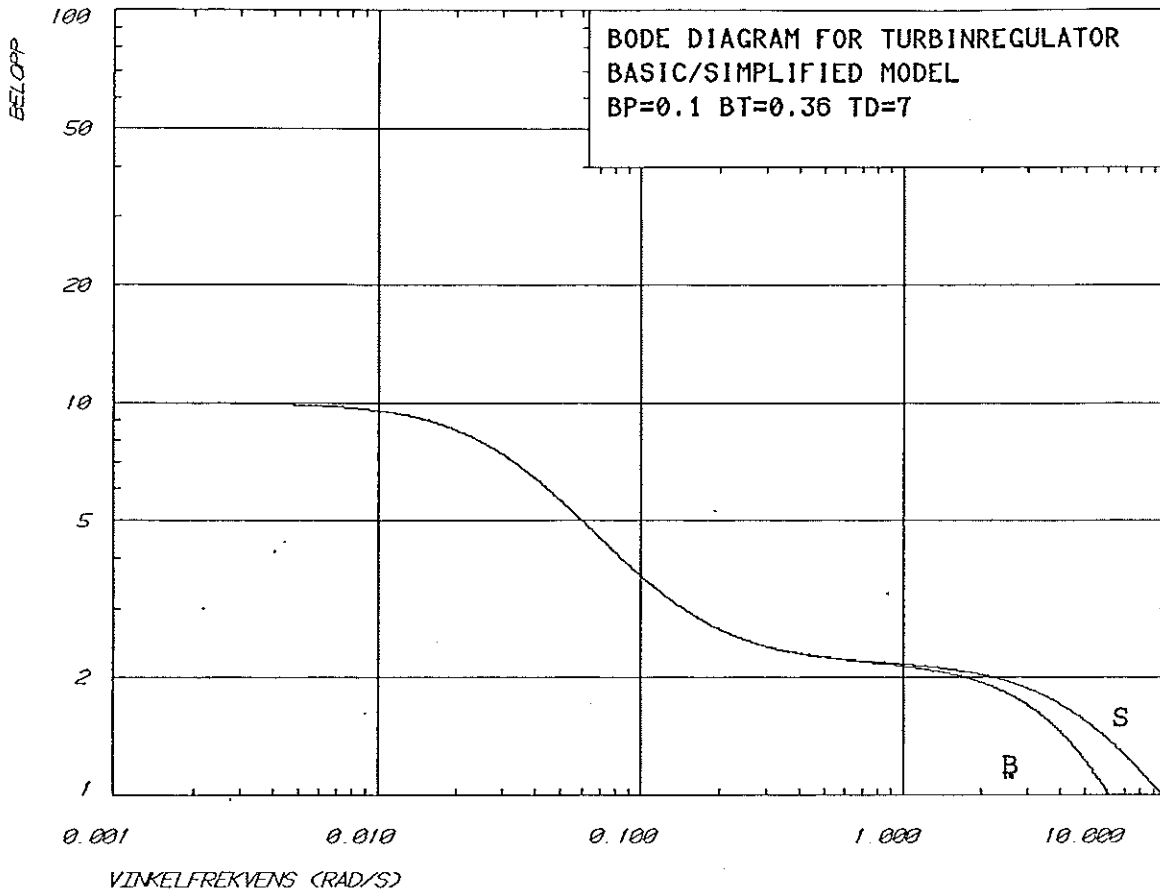
FS, FF2	: Hz resp. s
Y2	: relativt pådrag resp. s
Y2ID	: relativt pådrag resp. s
Y2LP(FELP)	: relativt pådrag resp. Hz

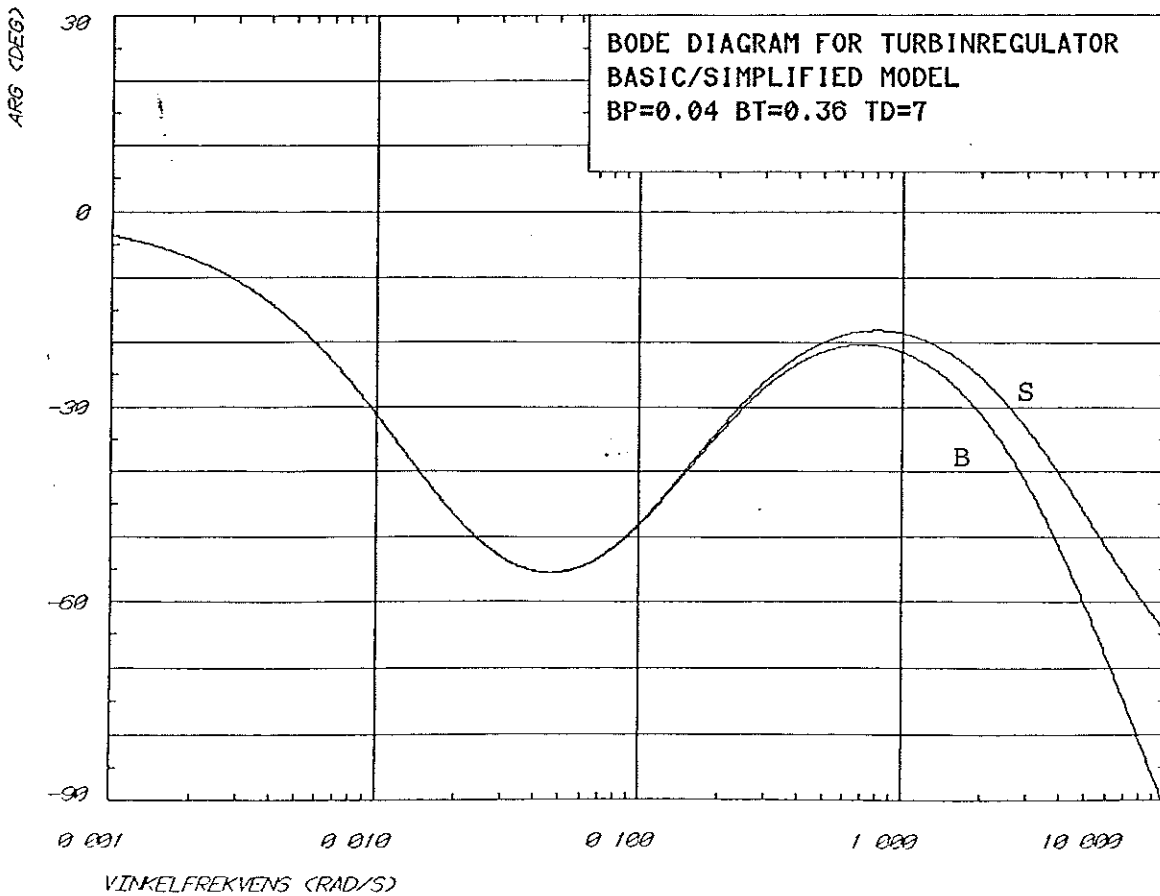
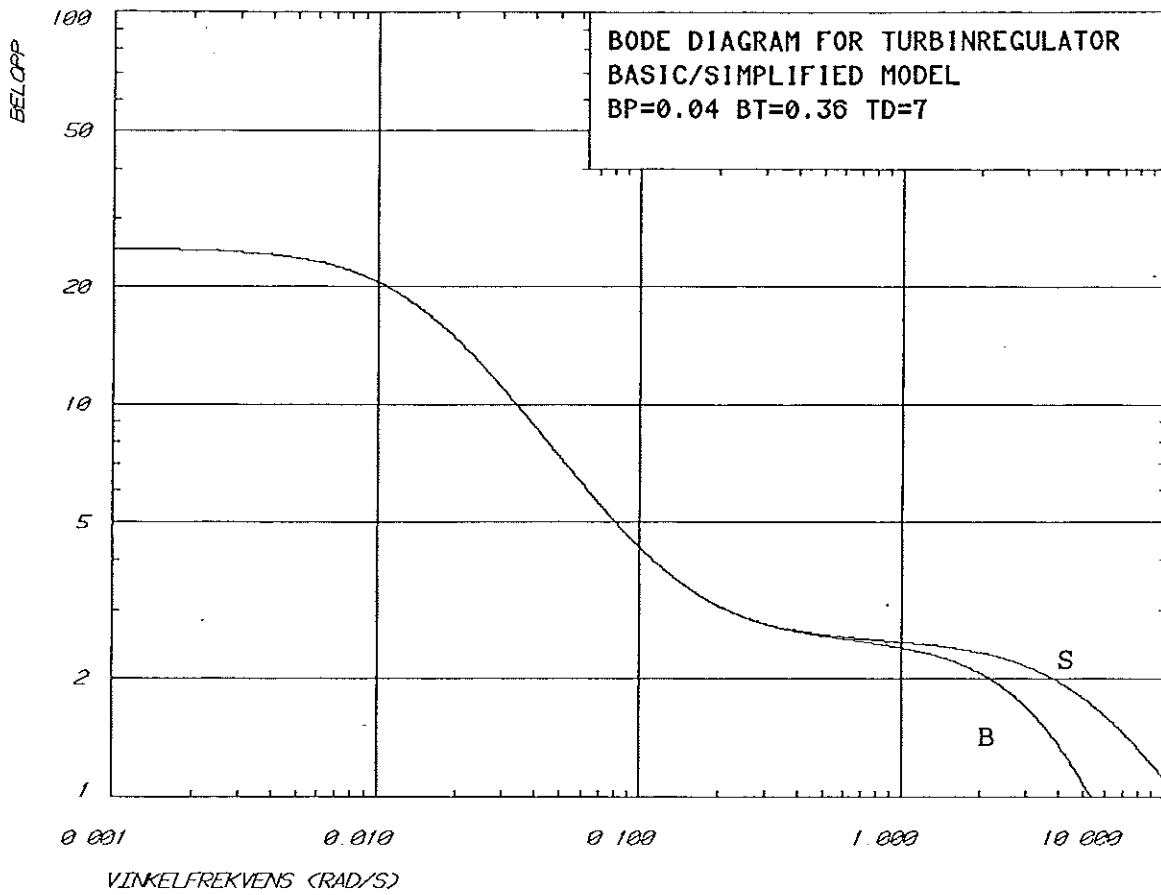


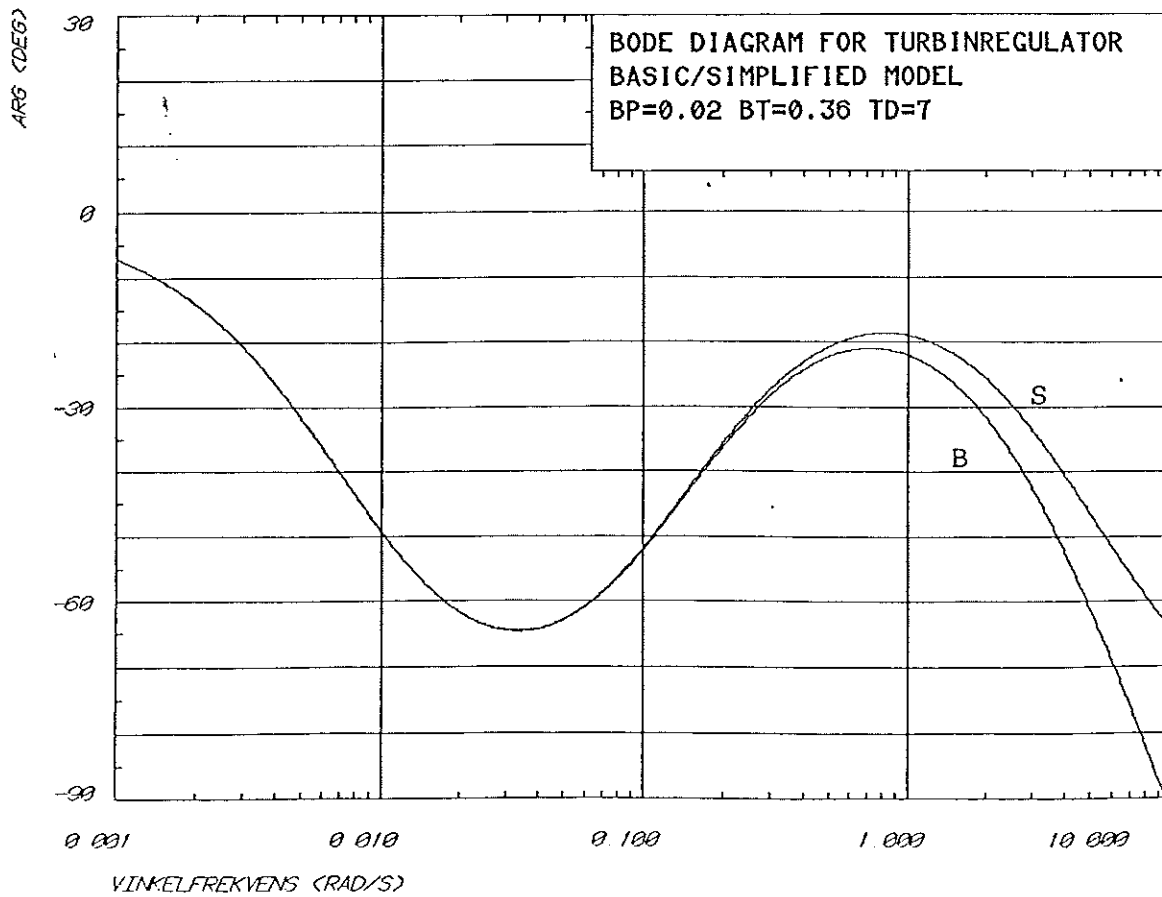
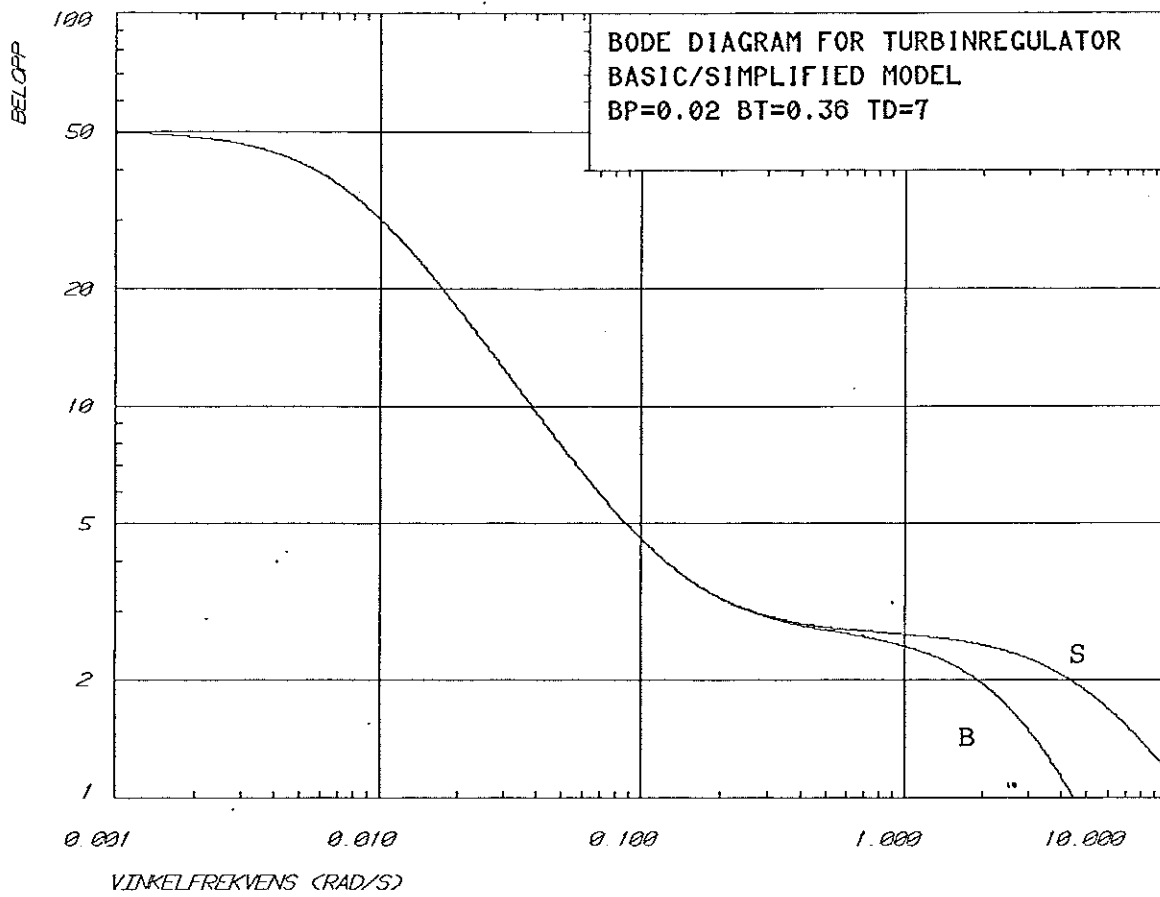


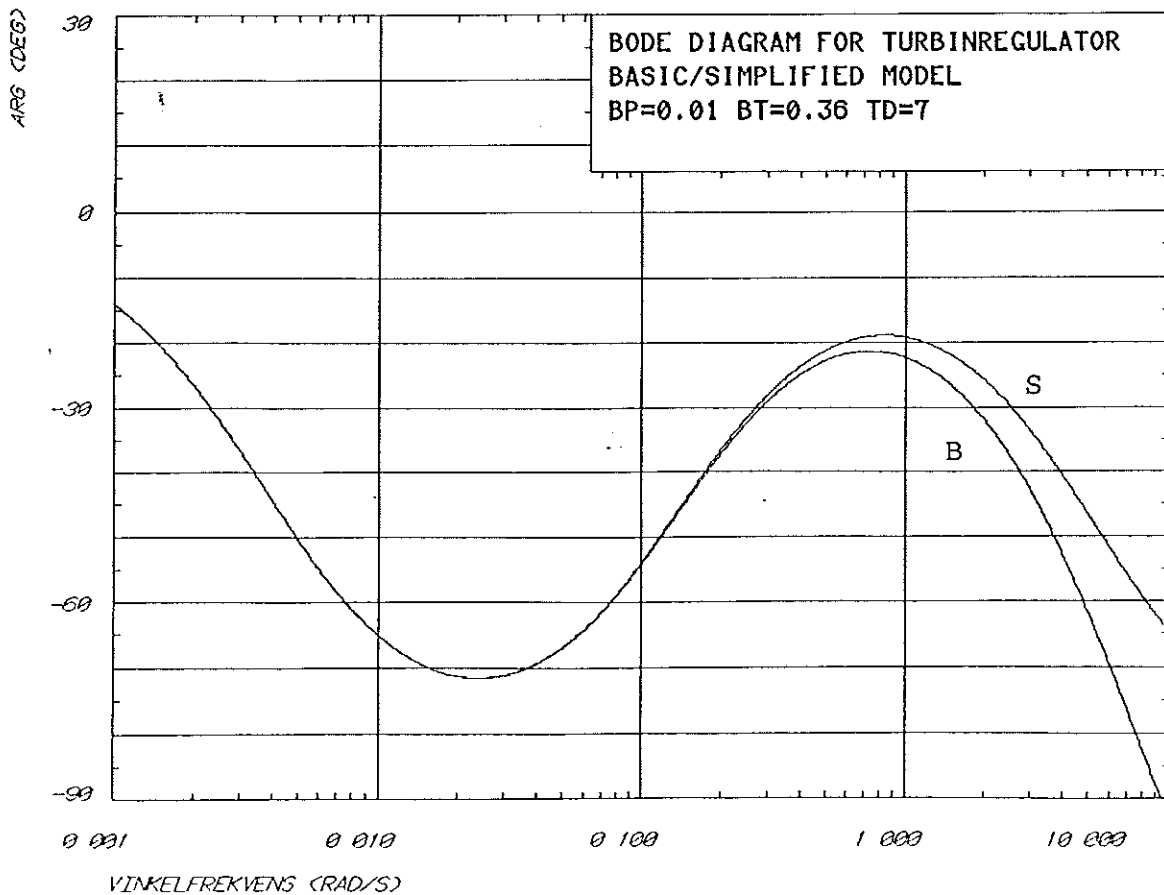
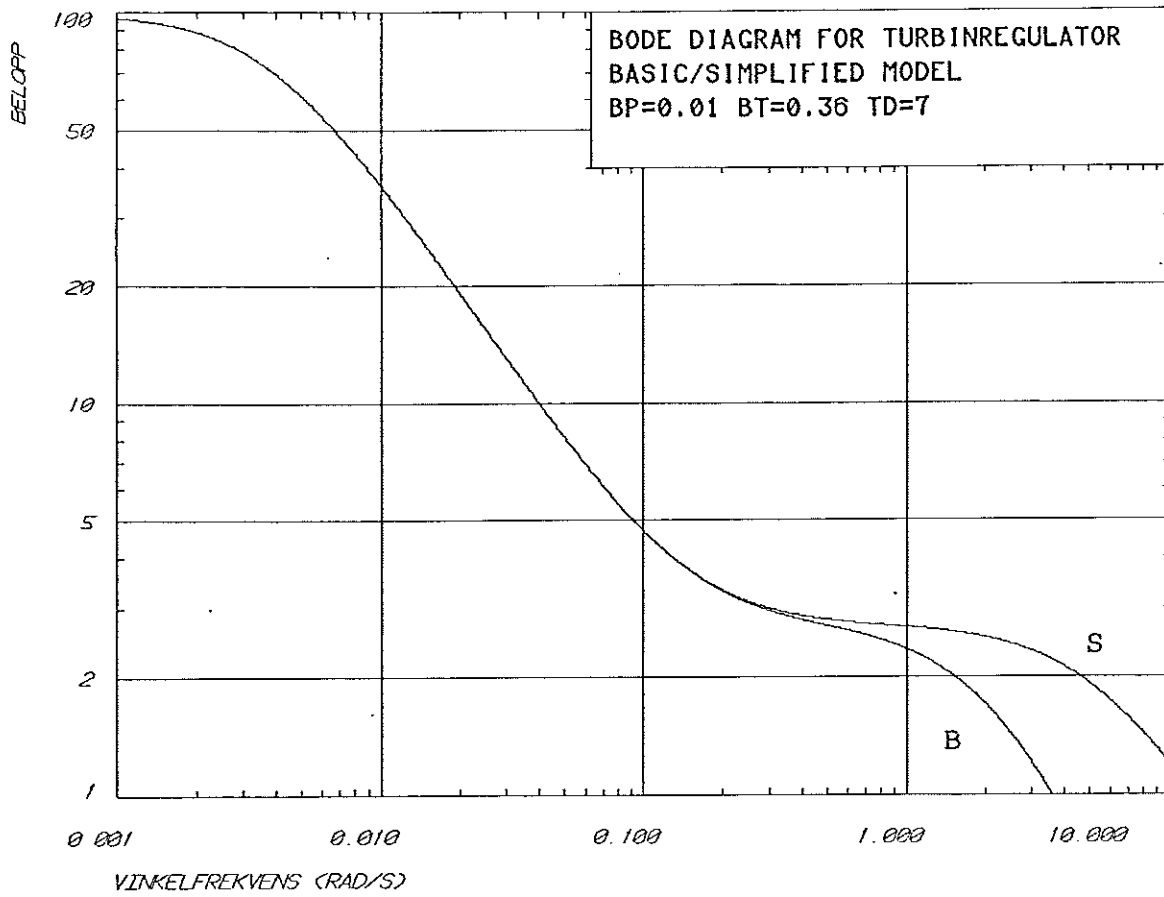


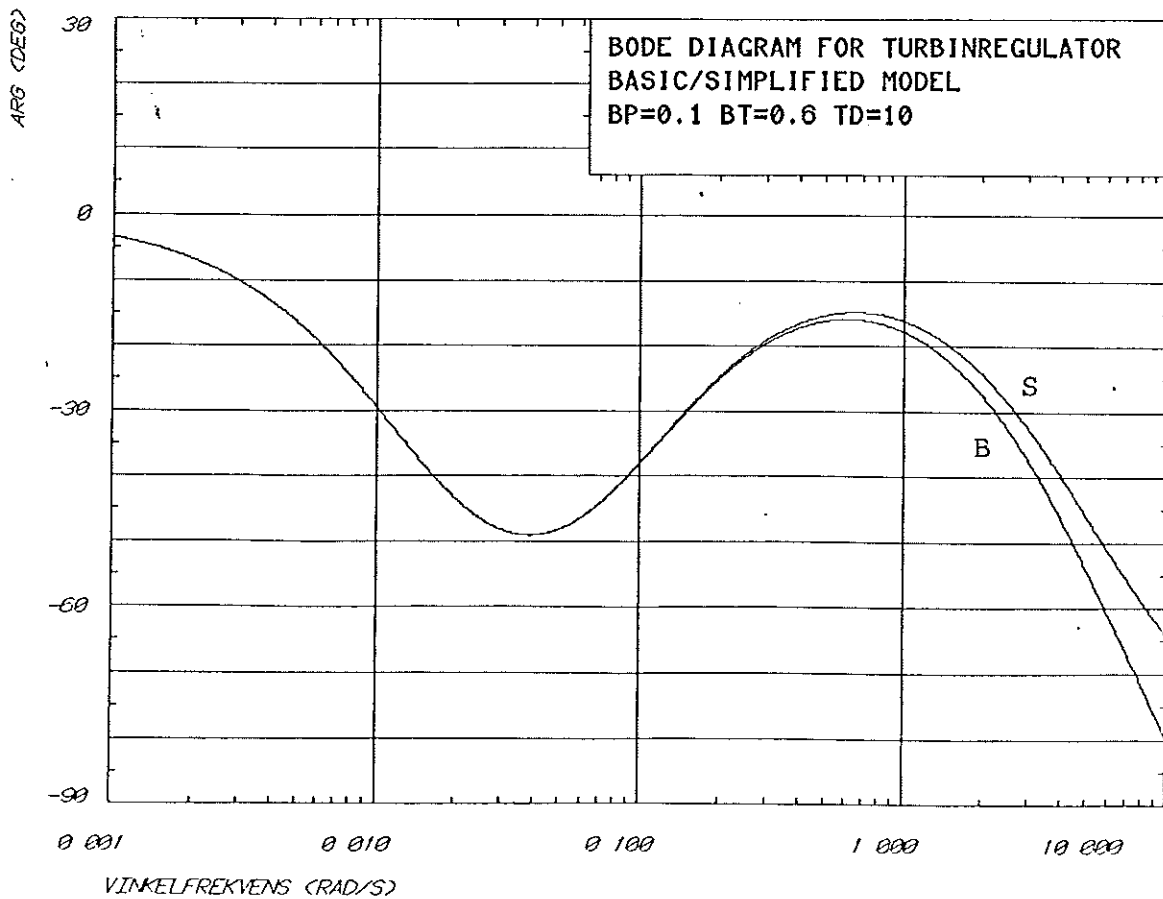
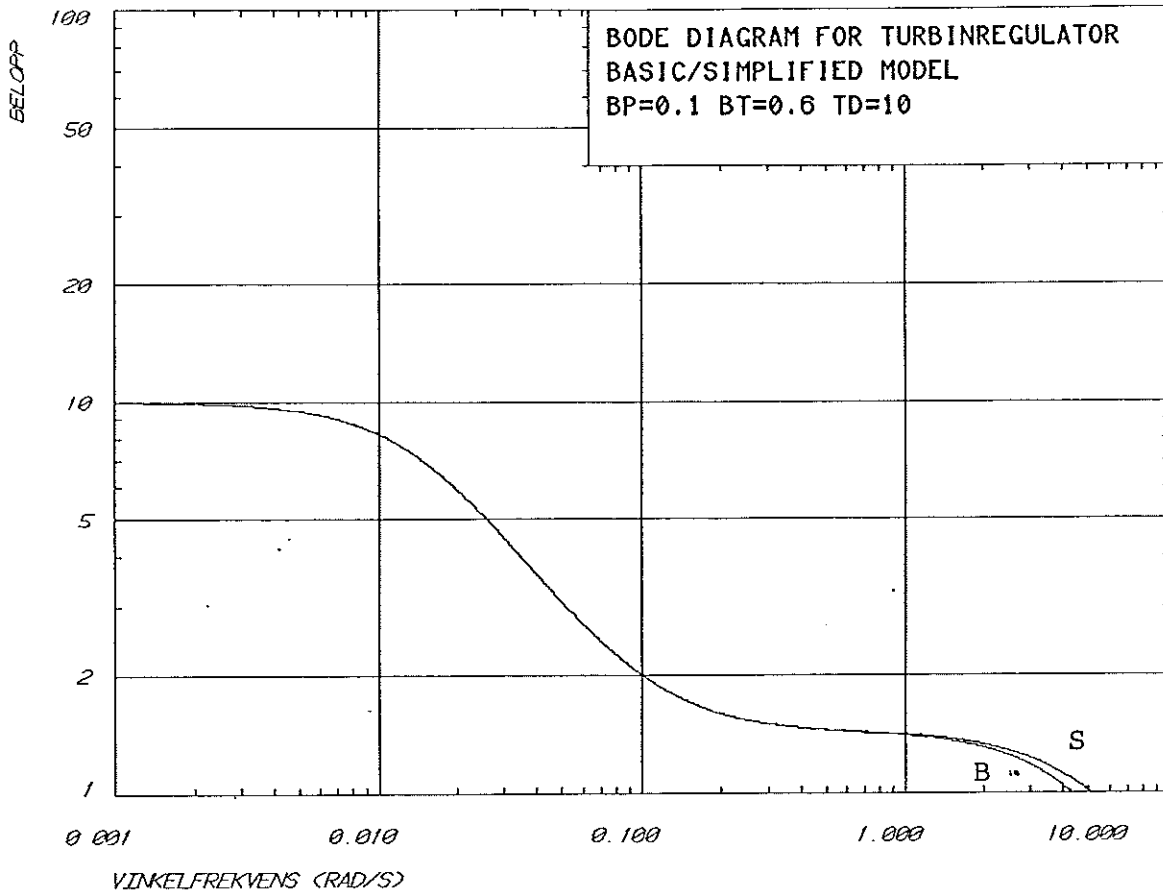


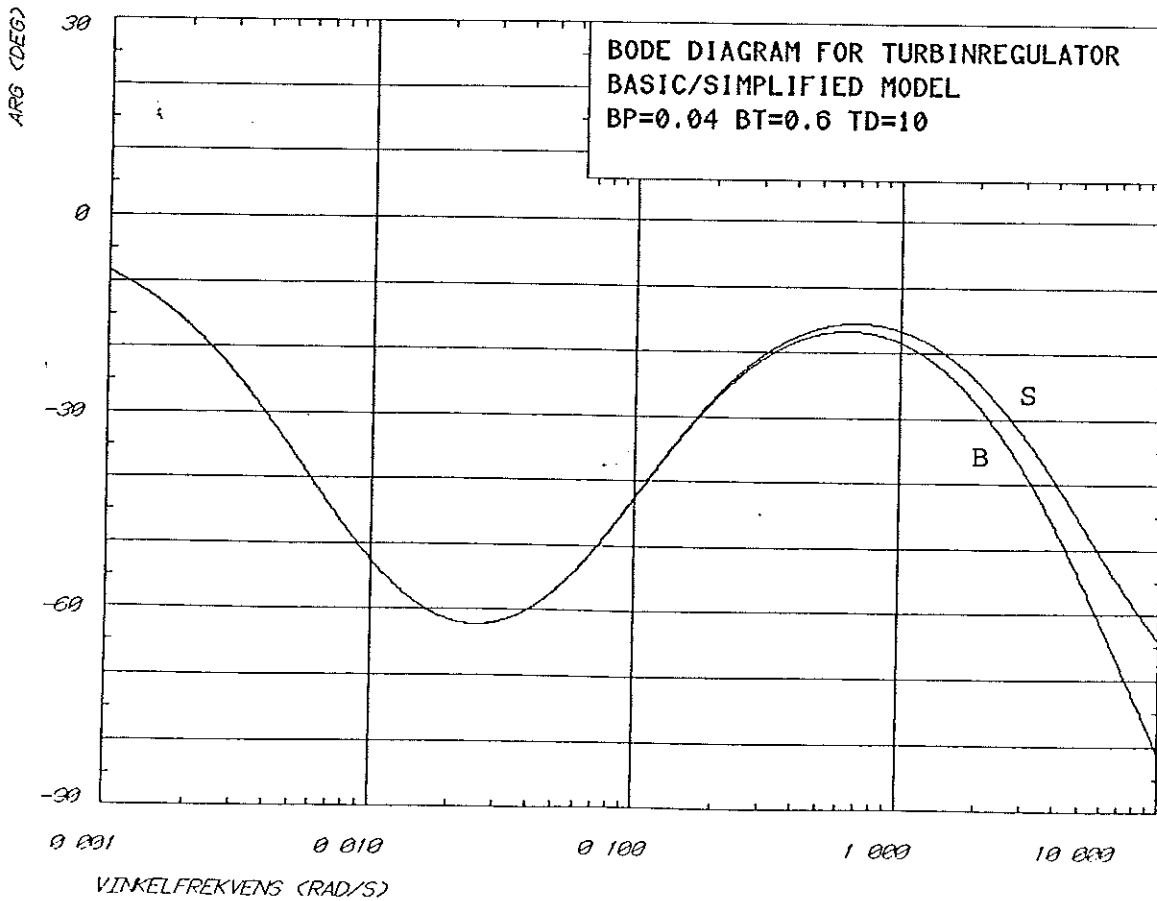
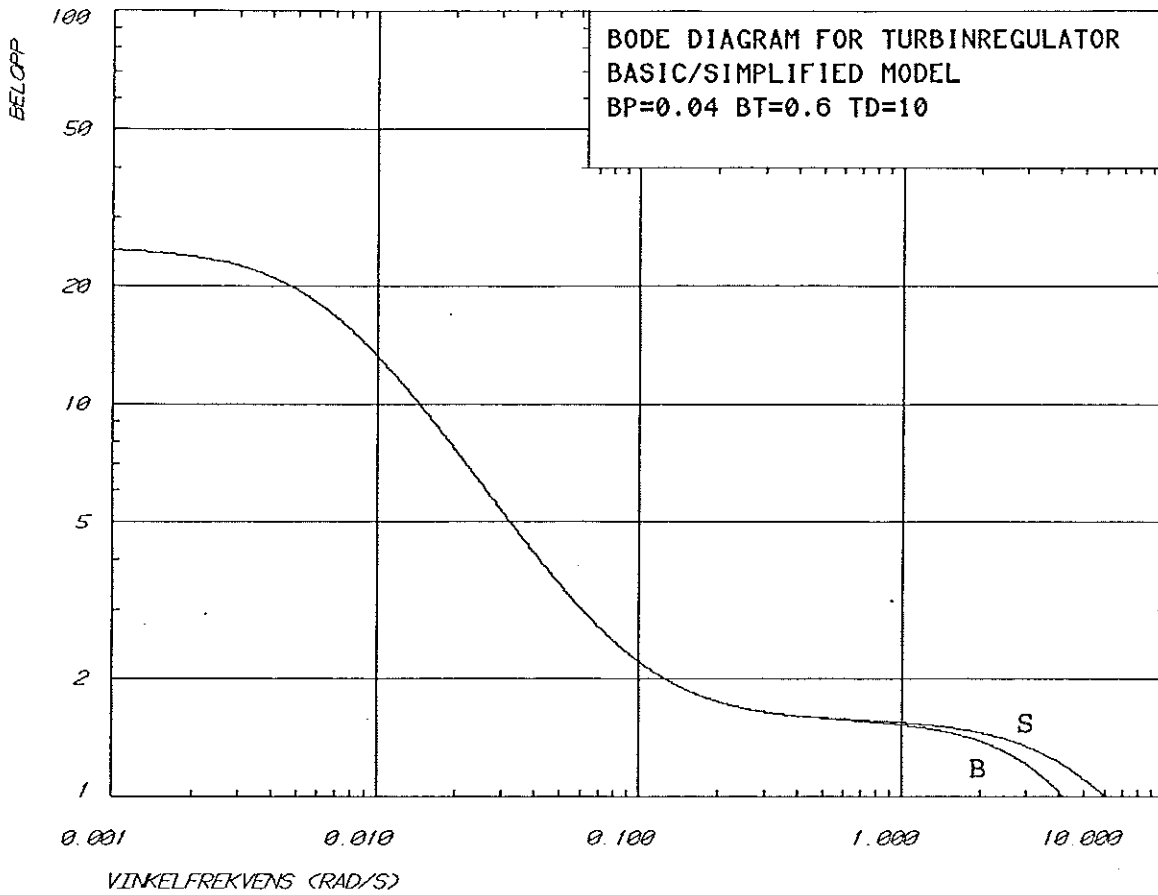


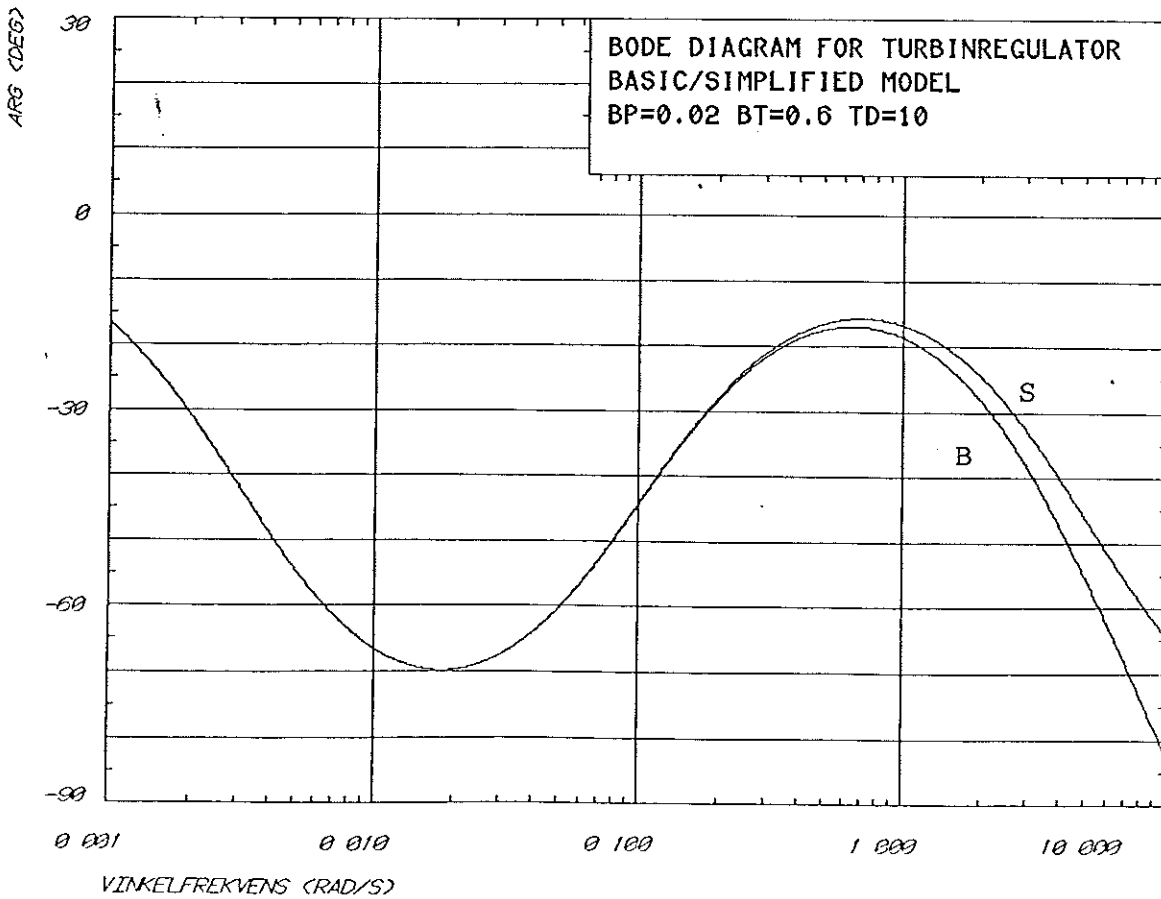
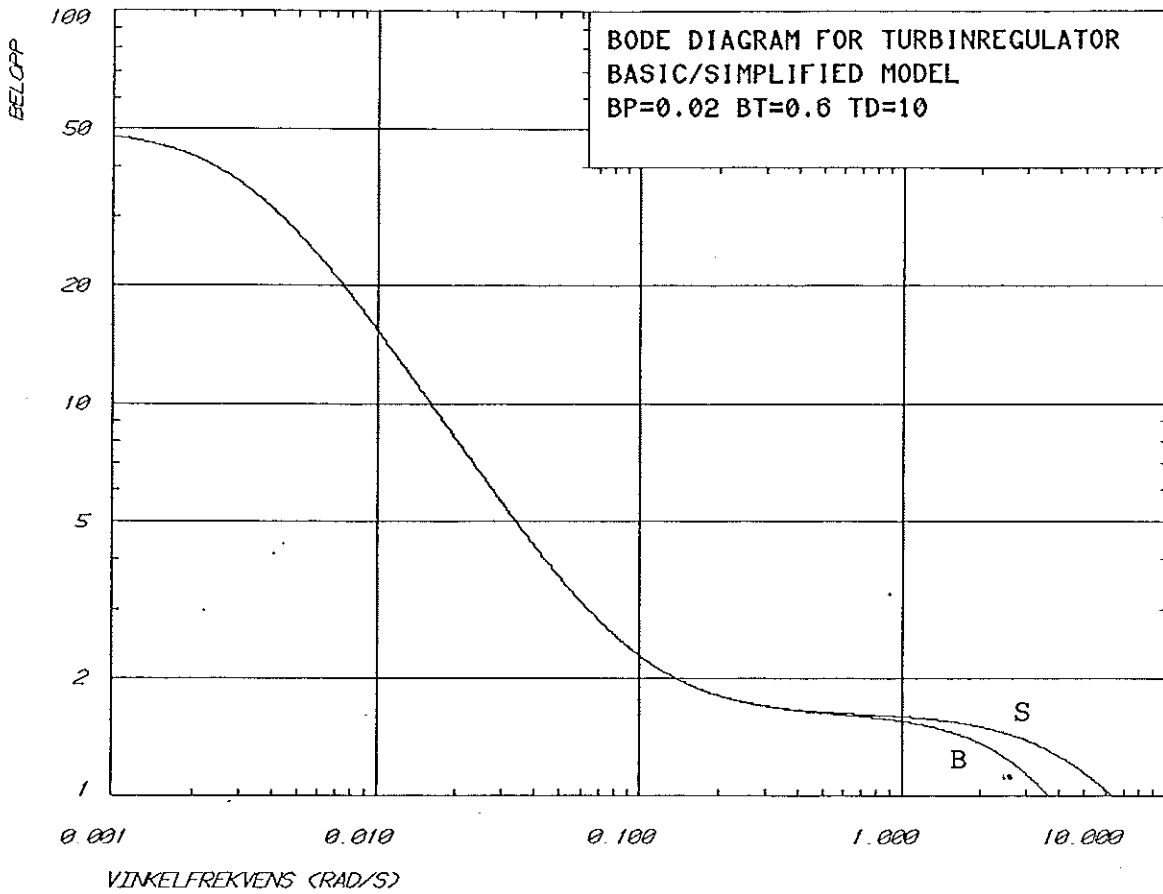


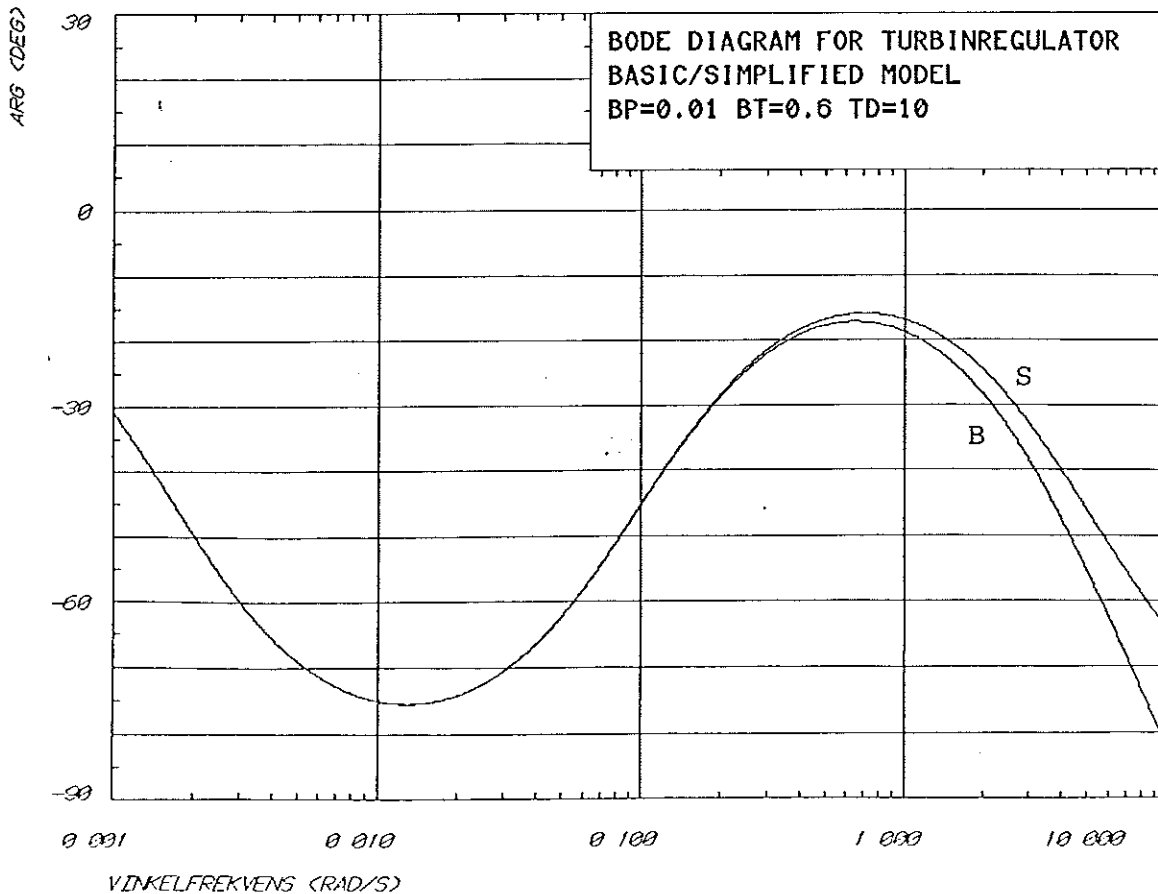
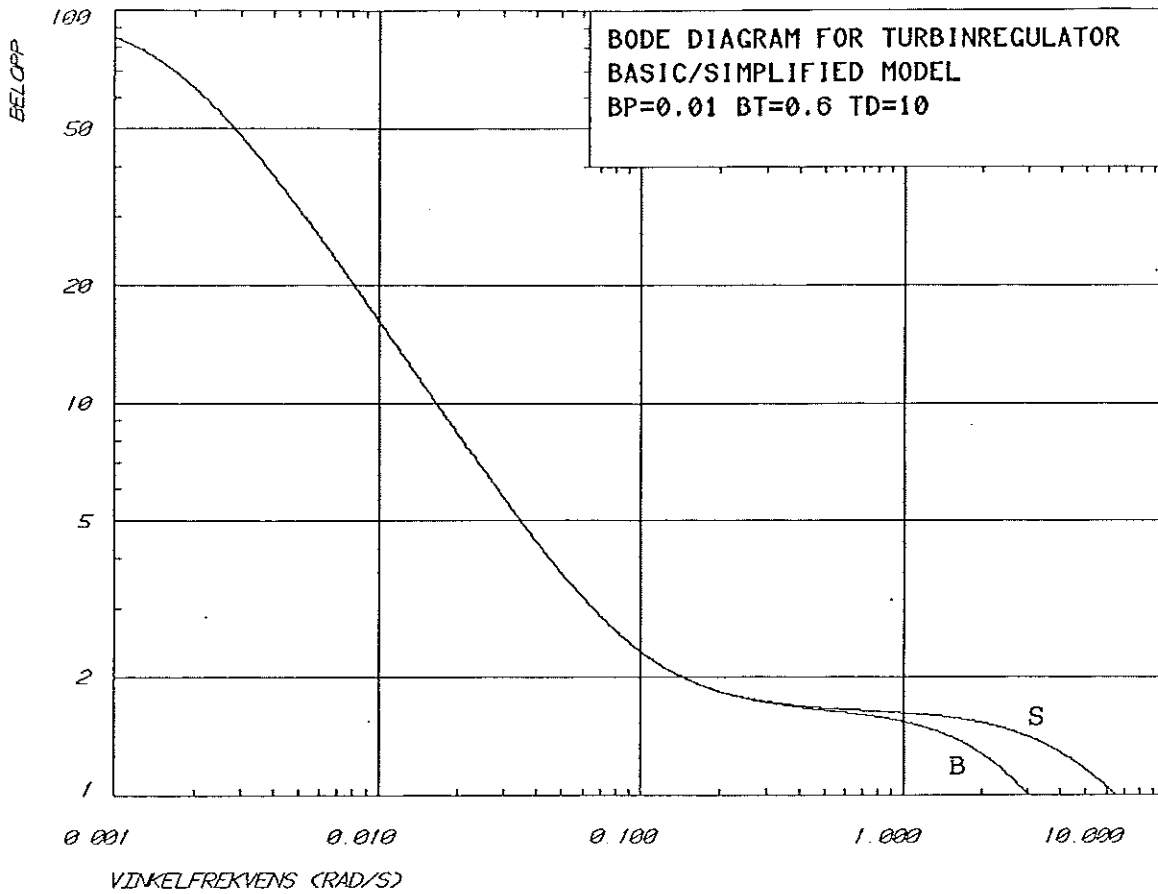


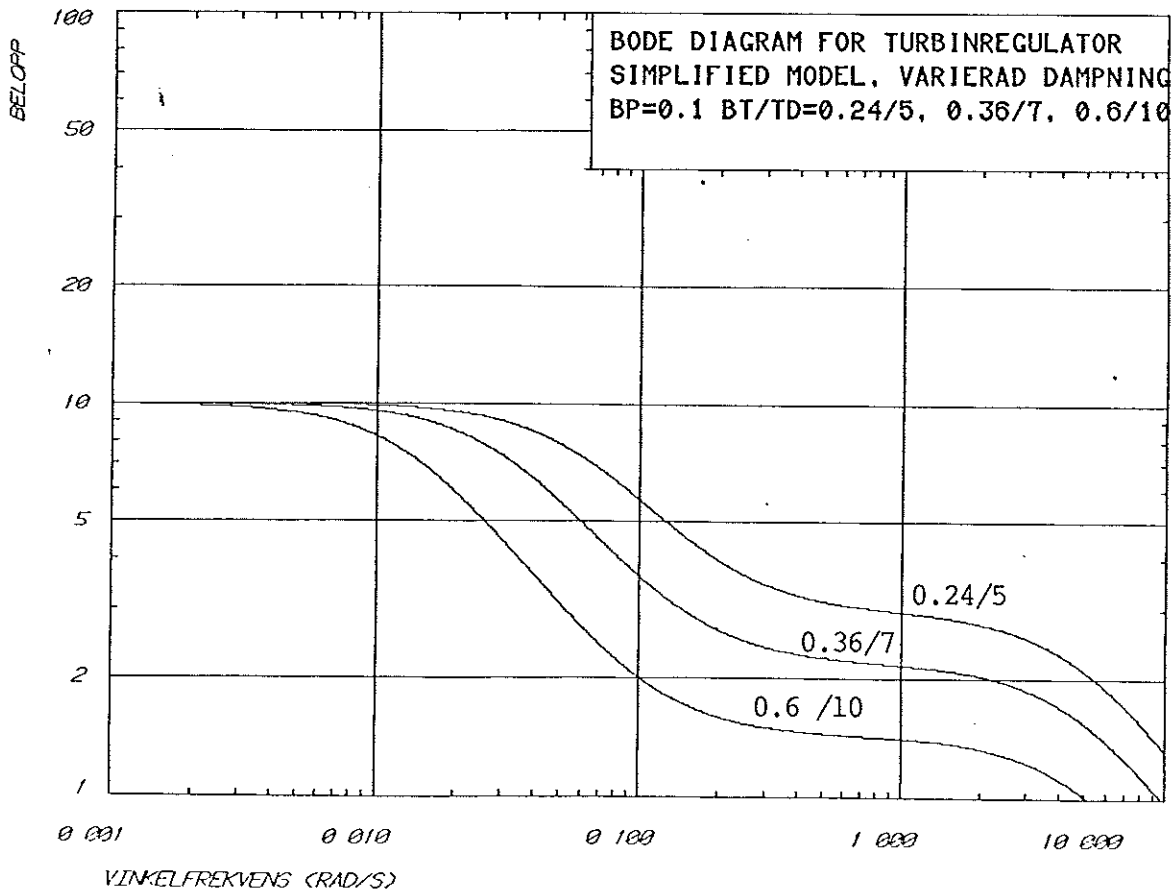
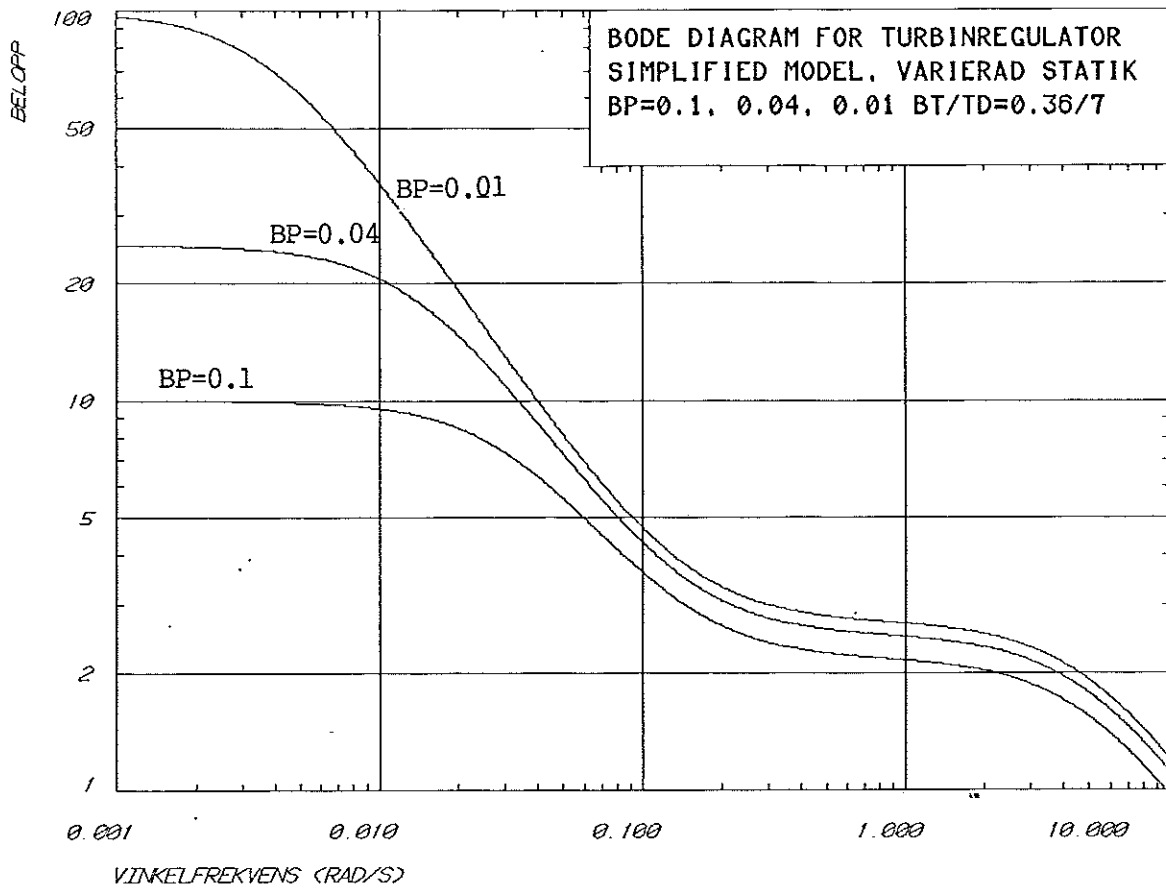


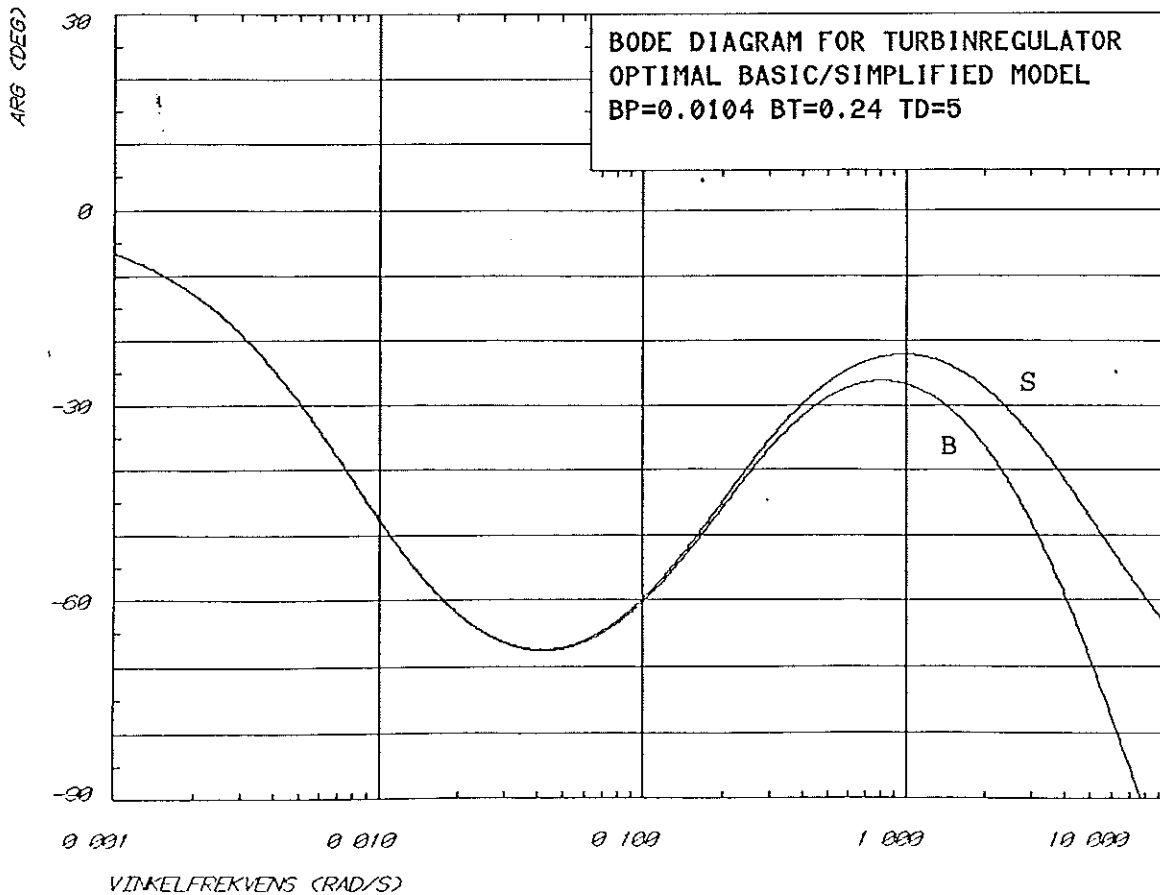
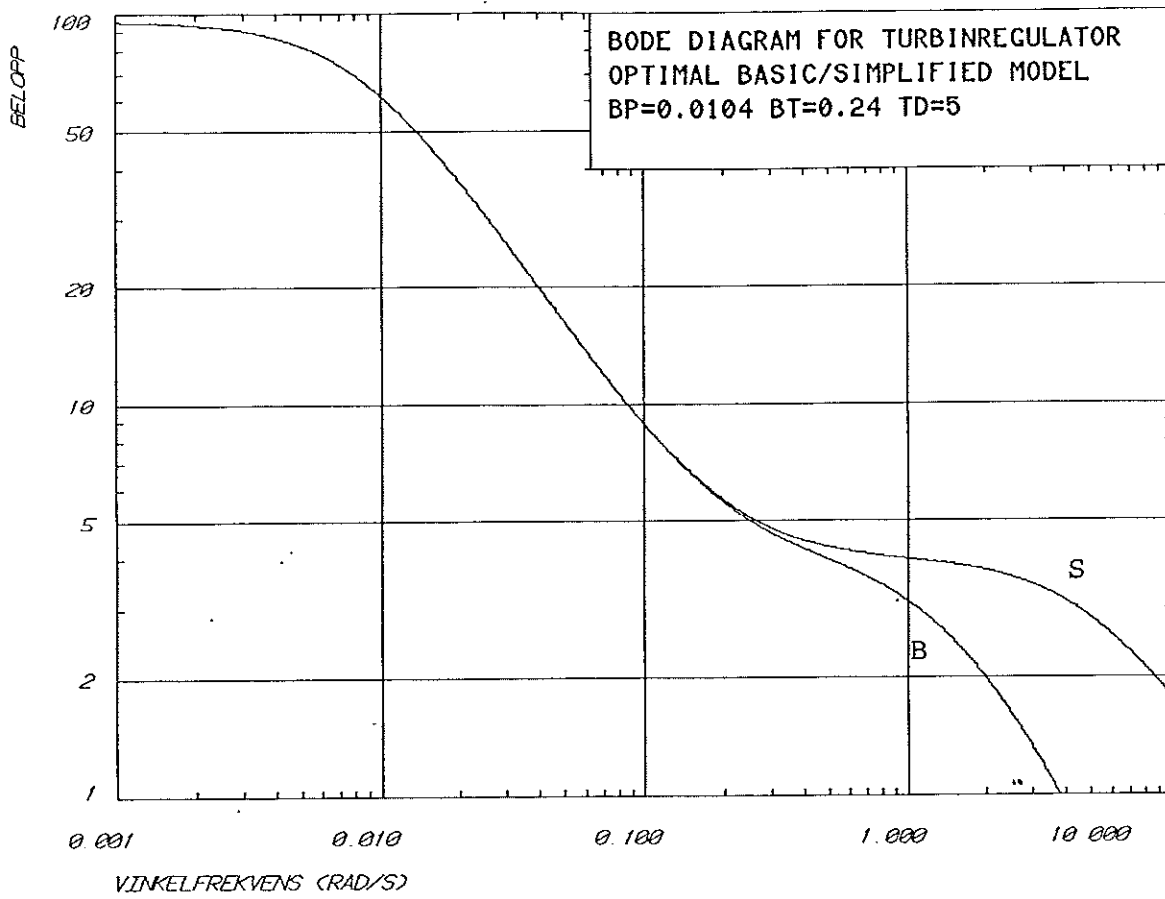


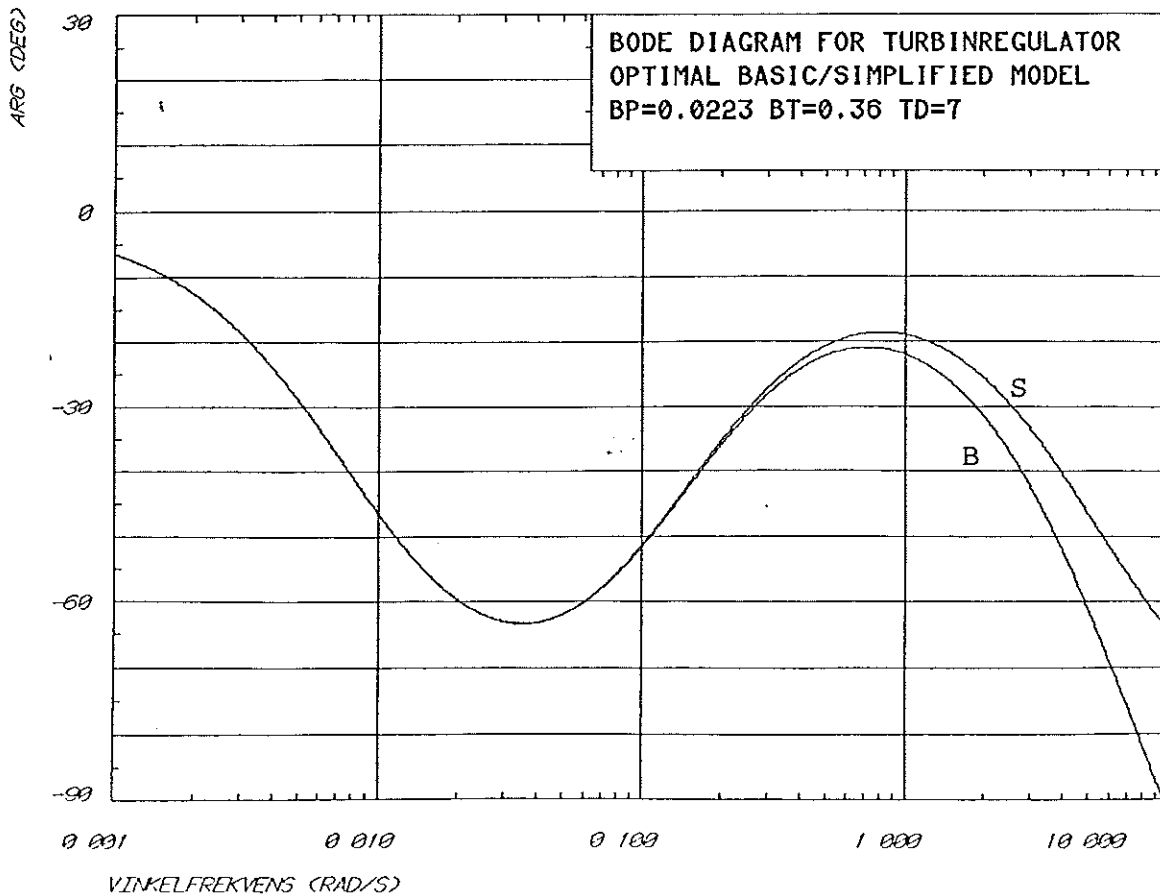
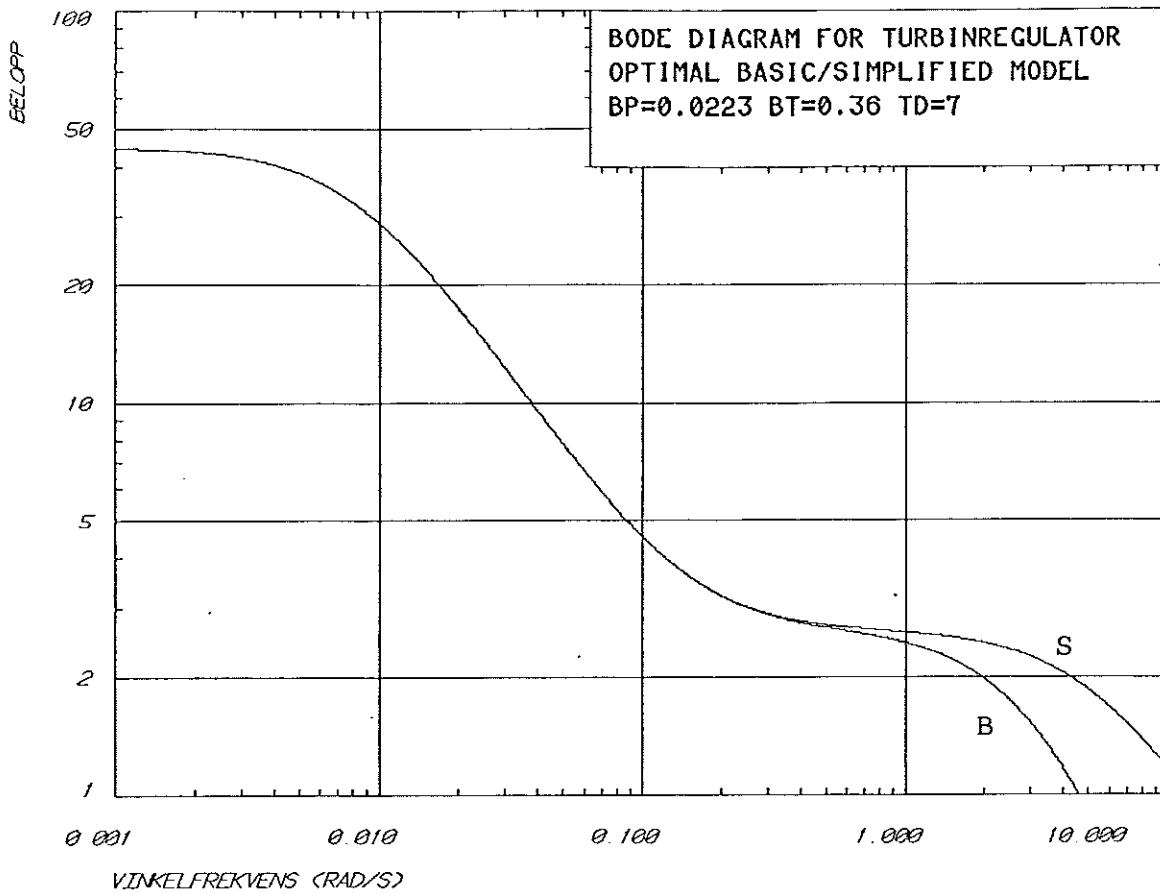


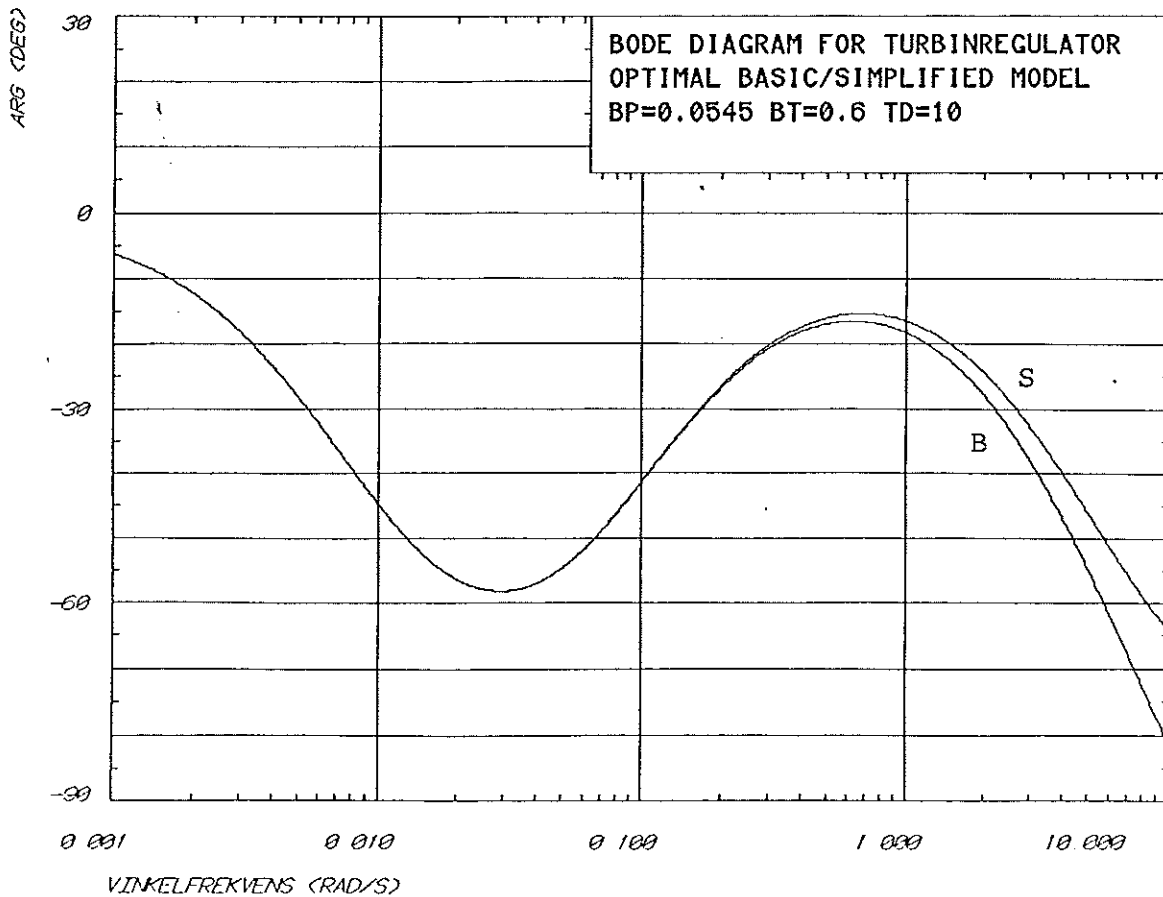
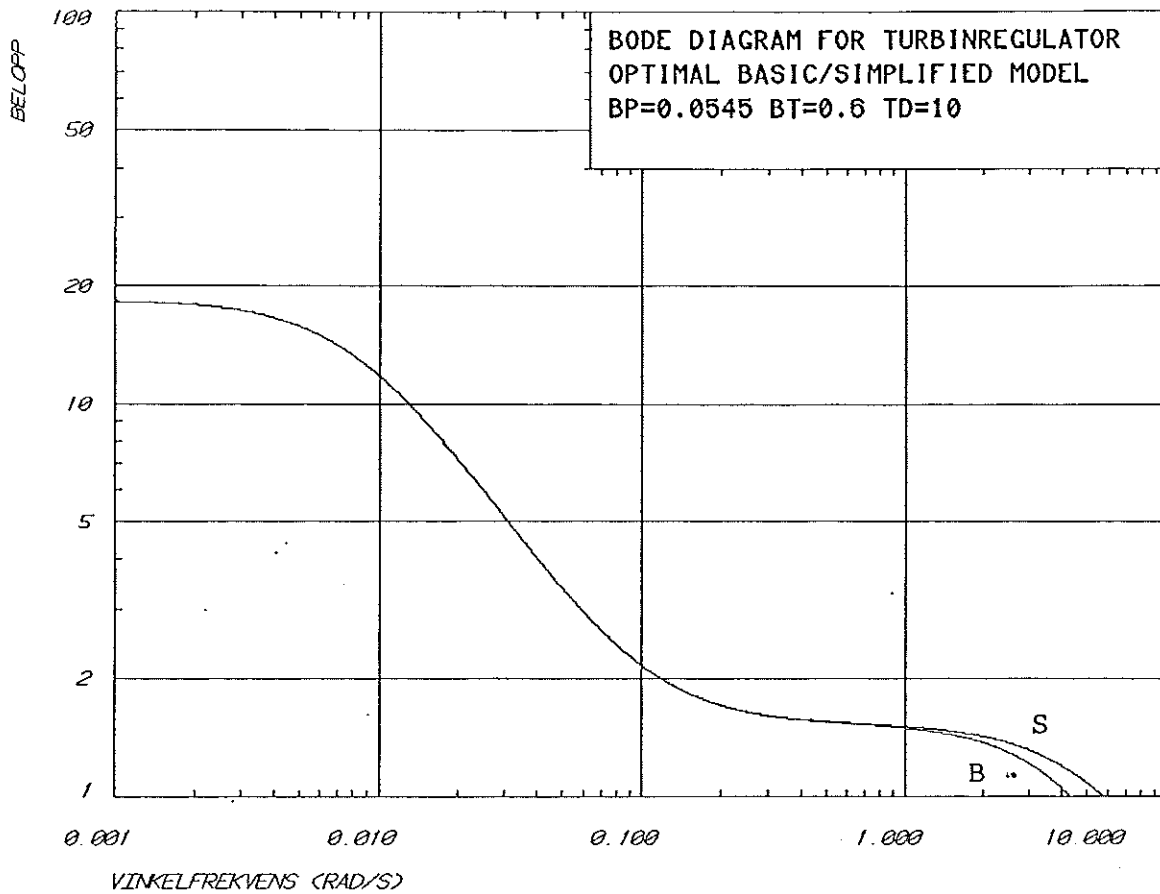






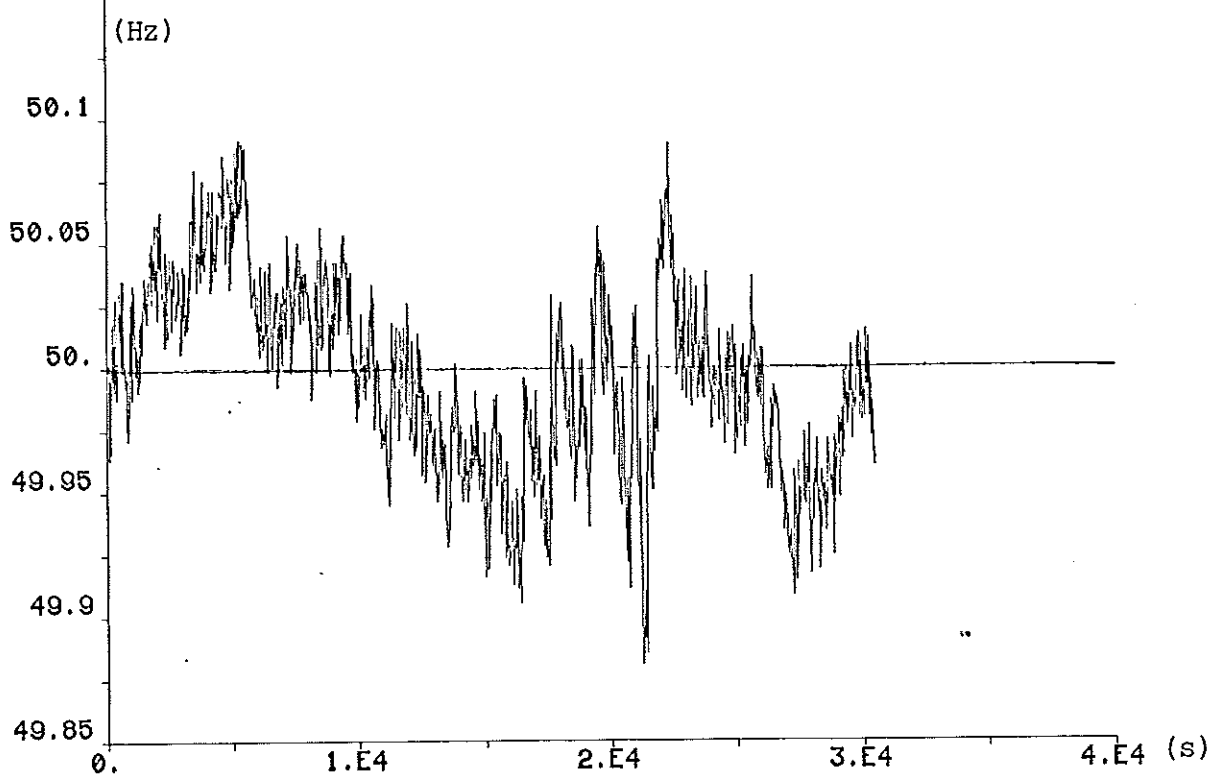




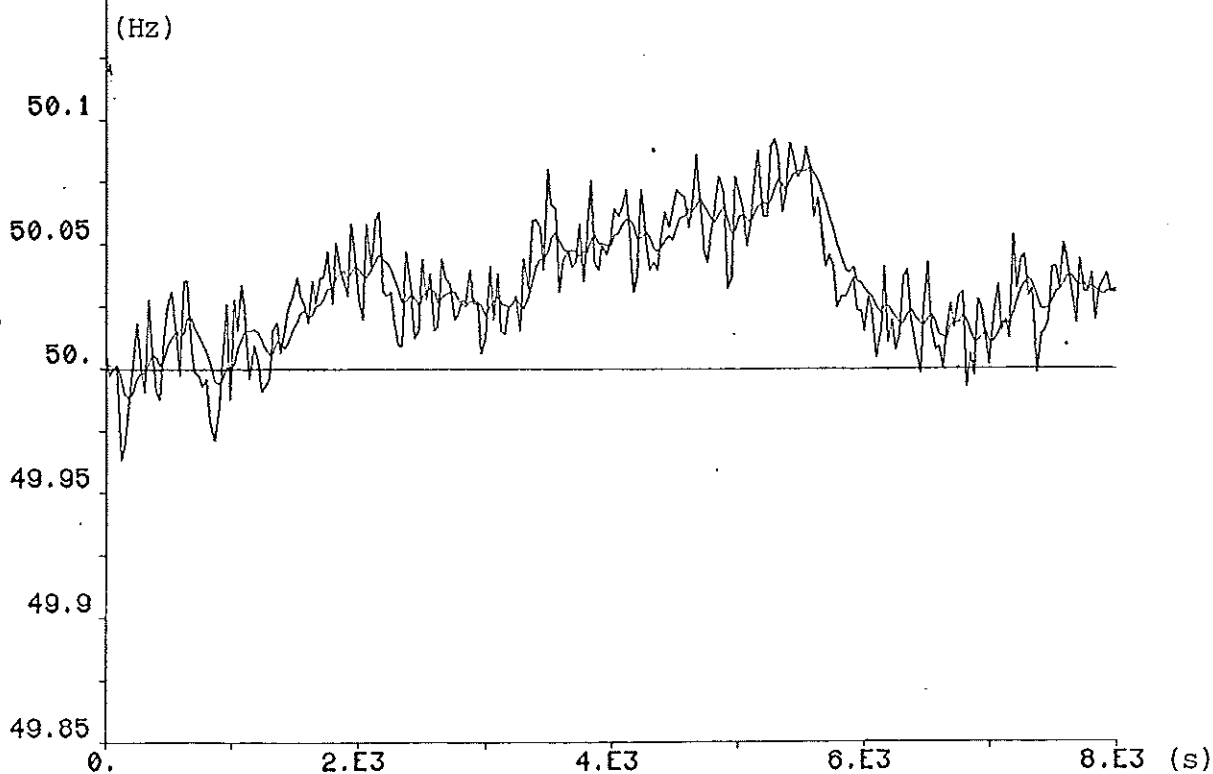


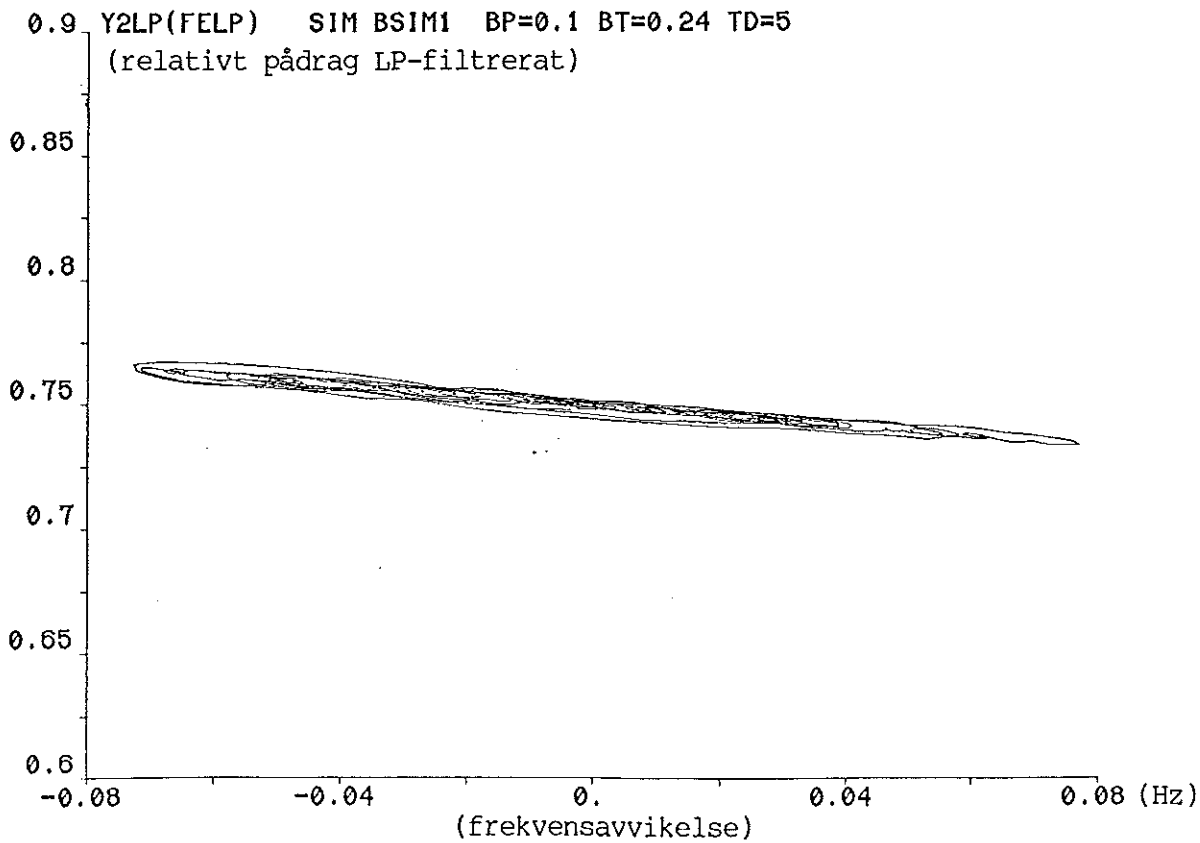
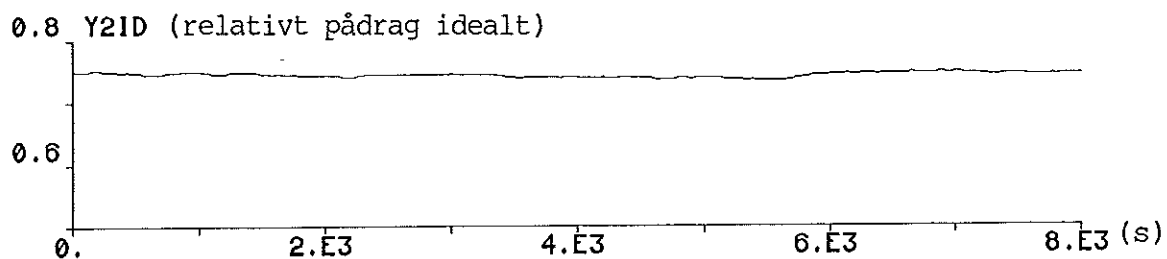
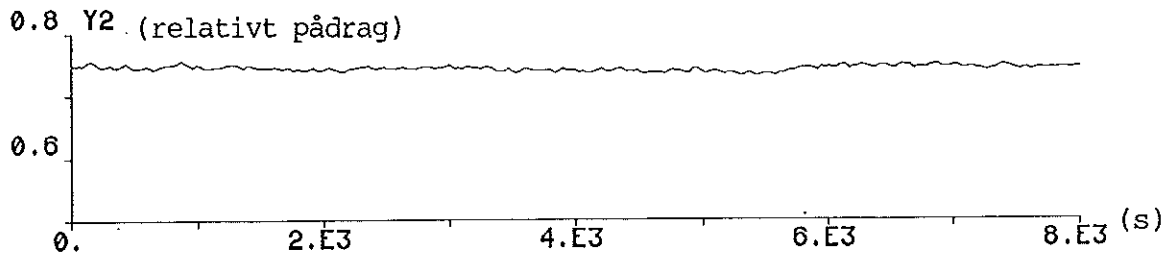
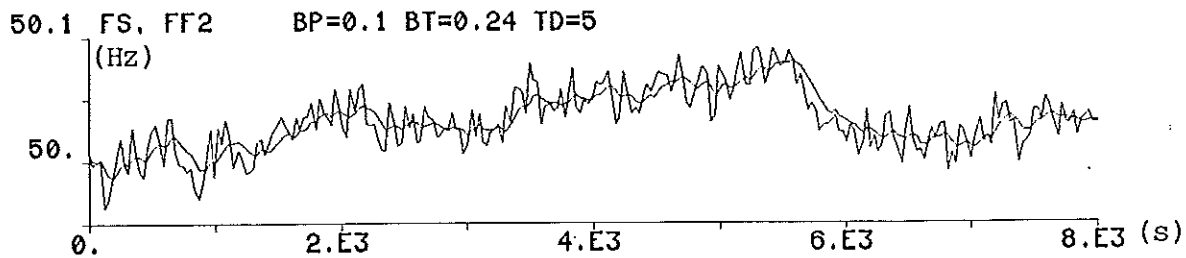
Nätfrekvensen FS som användes som indata vid simuleringarna. FS är samplade 2-sekunders värde på frekvensen i NORDEL-systemet under ett sammanhängande tidsintervall om ca 8.5 h. Här visas dels hela mätperioden om 8.5 h (övre diagram), dels de första 2.2 h av mätperioden samt ett glidande 2-minuters medelvärde som är betecknat FF2. (nedre diagram).

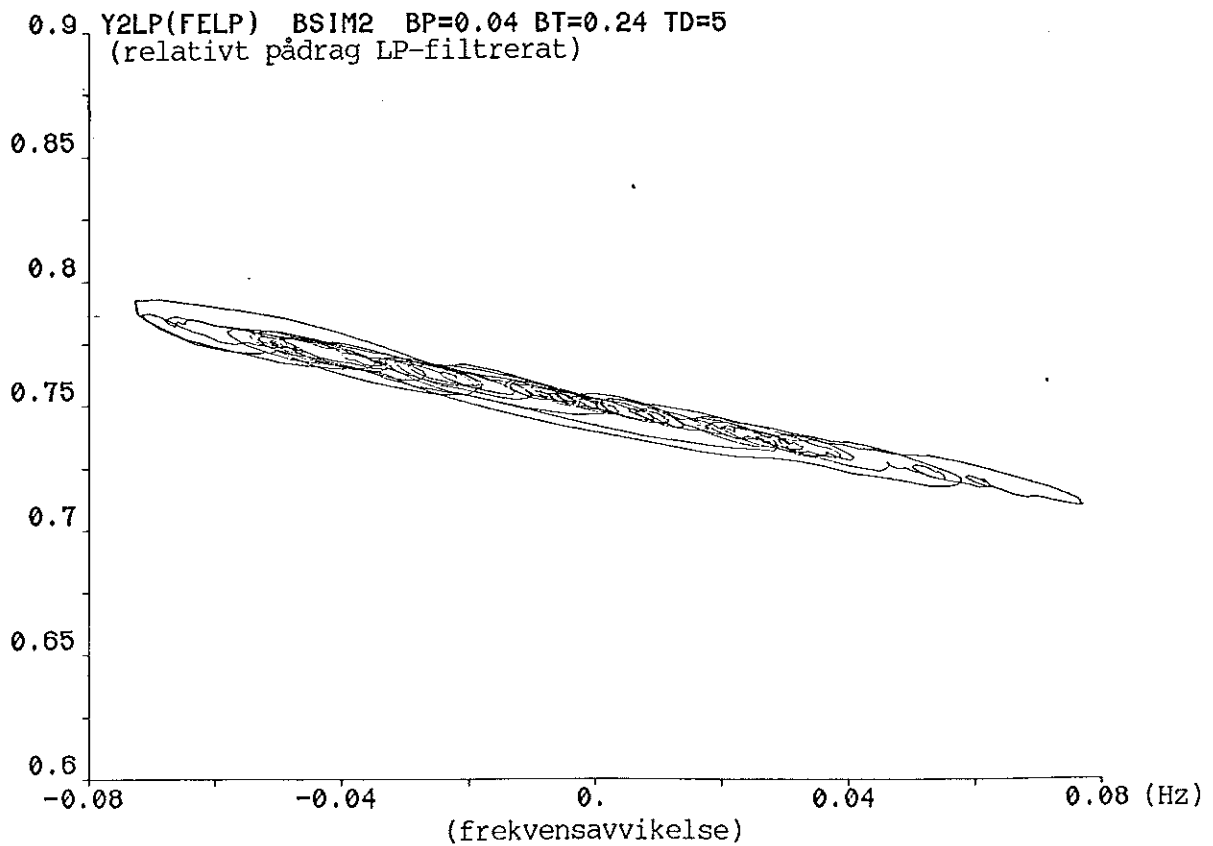
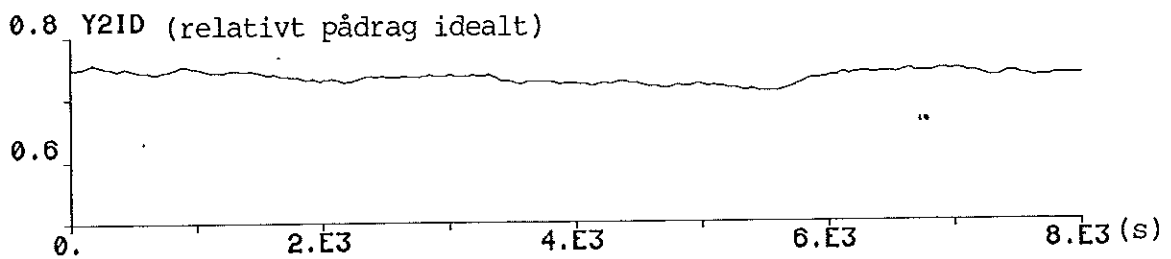
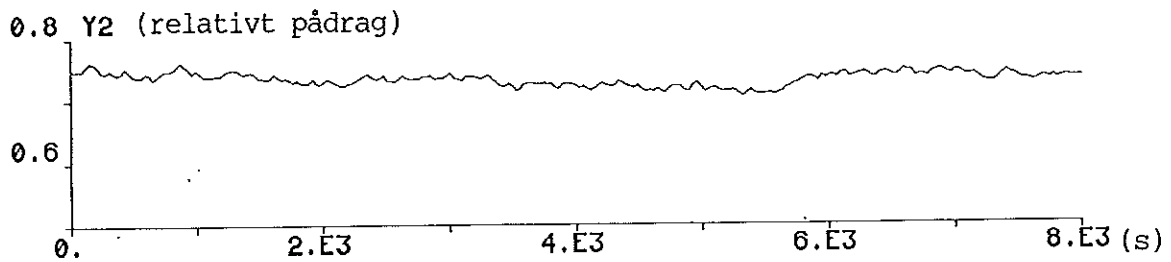
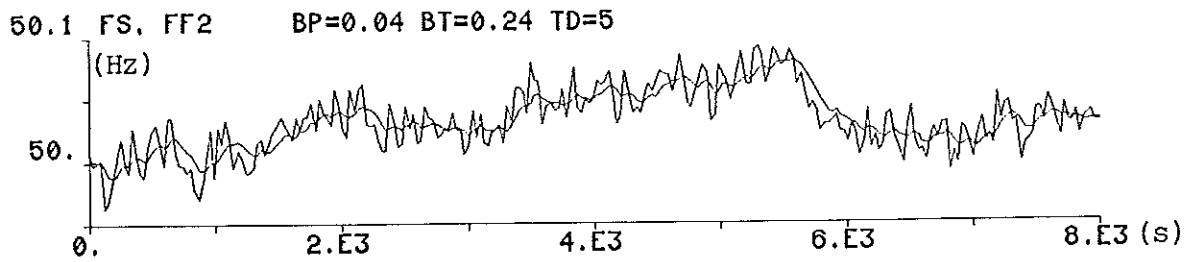
50.15 FS Nätfrekvensen under 30 464 s = 8.5 h

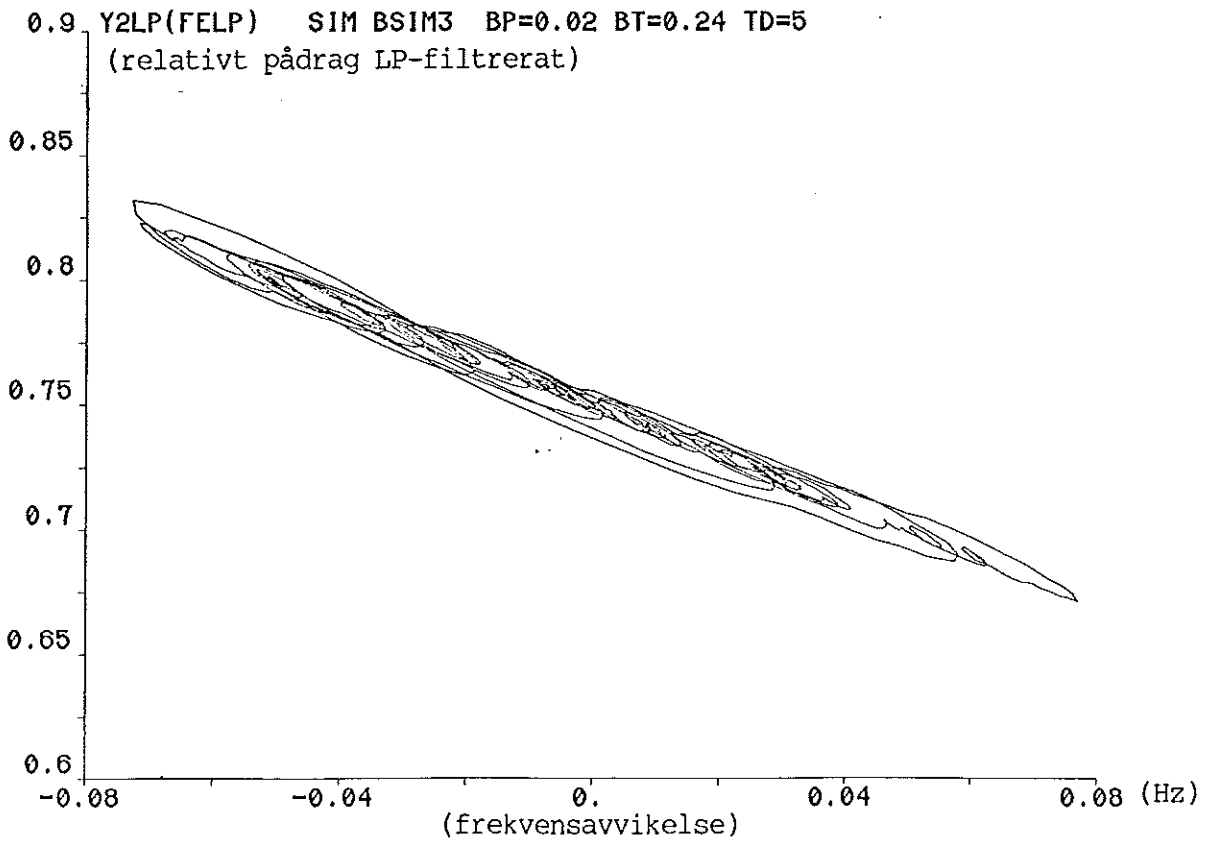
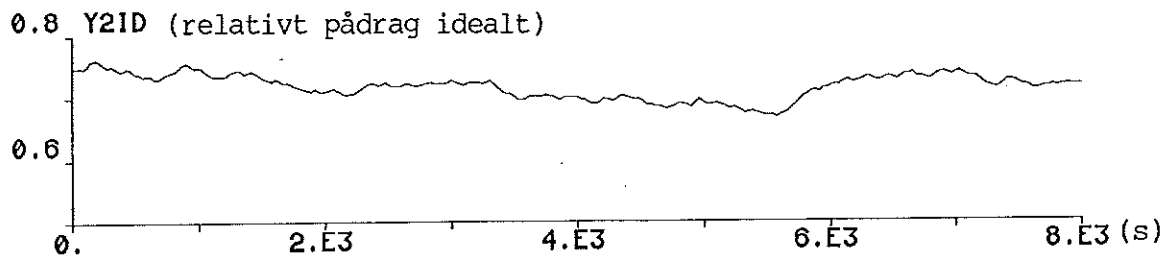
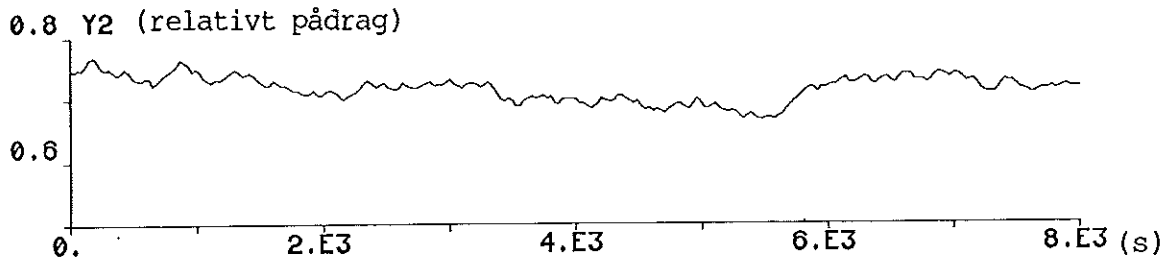
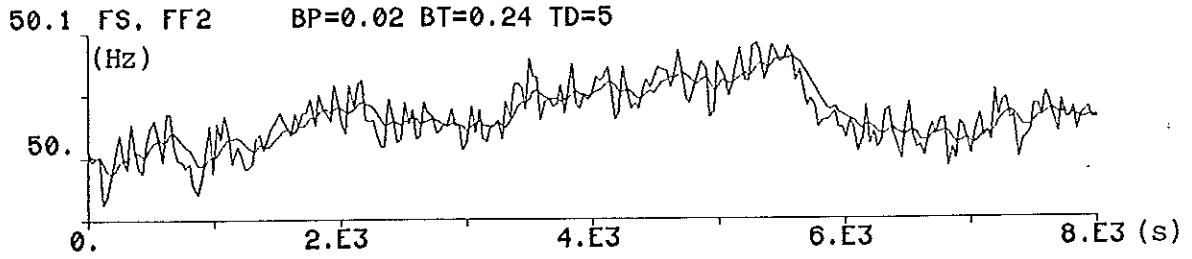


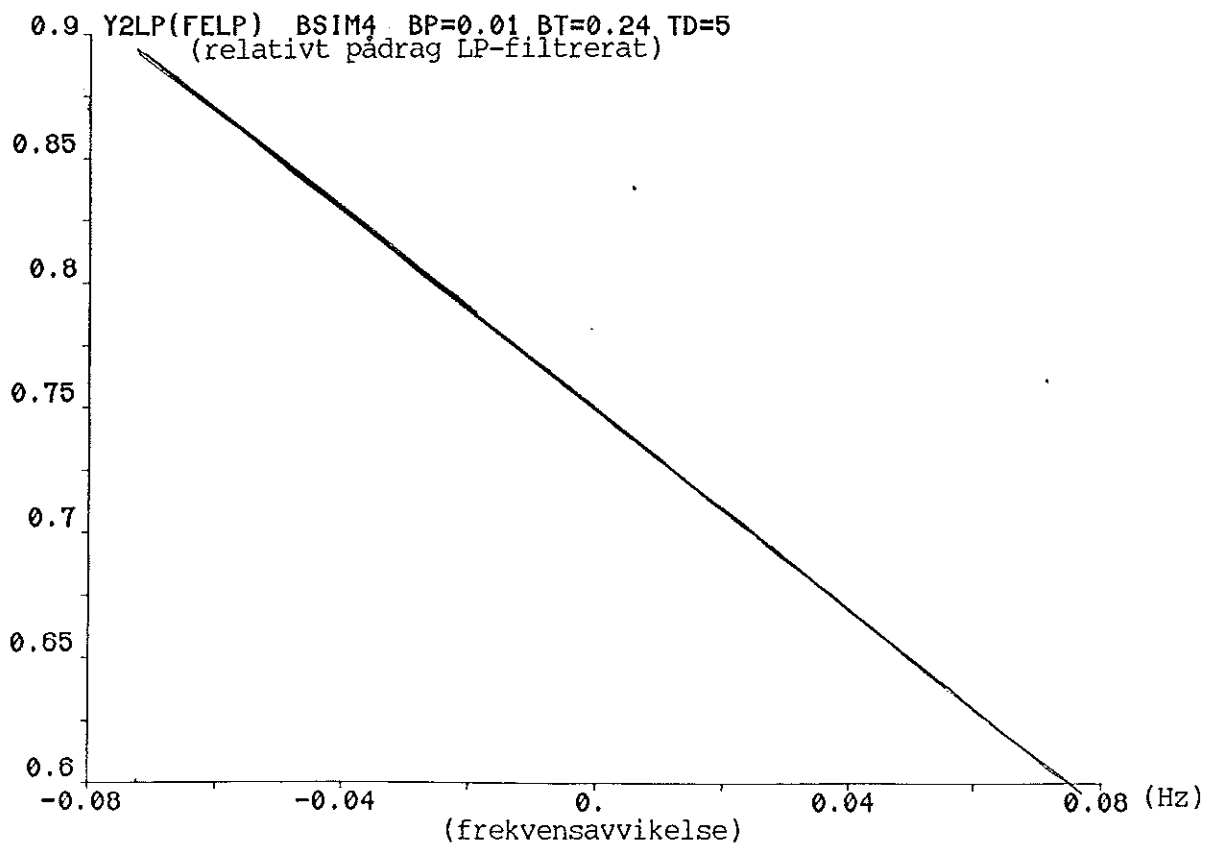
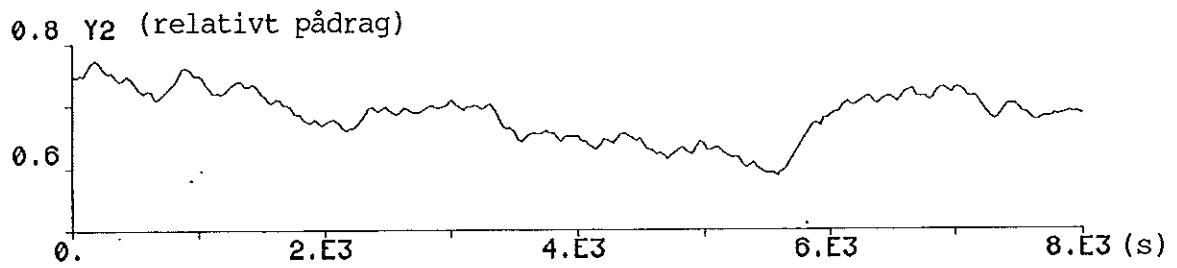
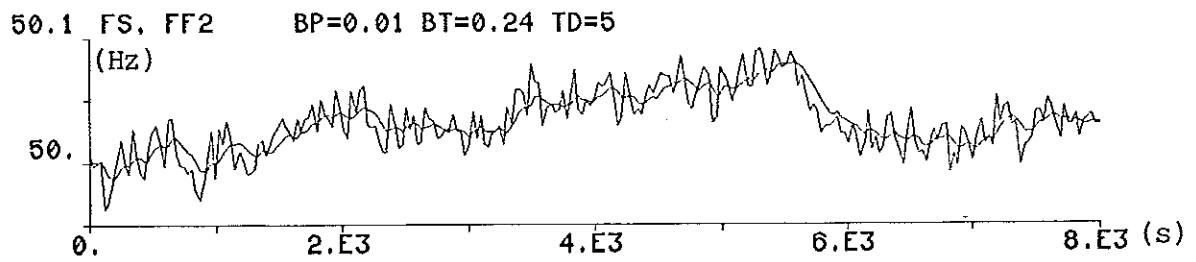
50.15 FS, FF2 Nätf. och 2-min. medelv. under 2.2h

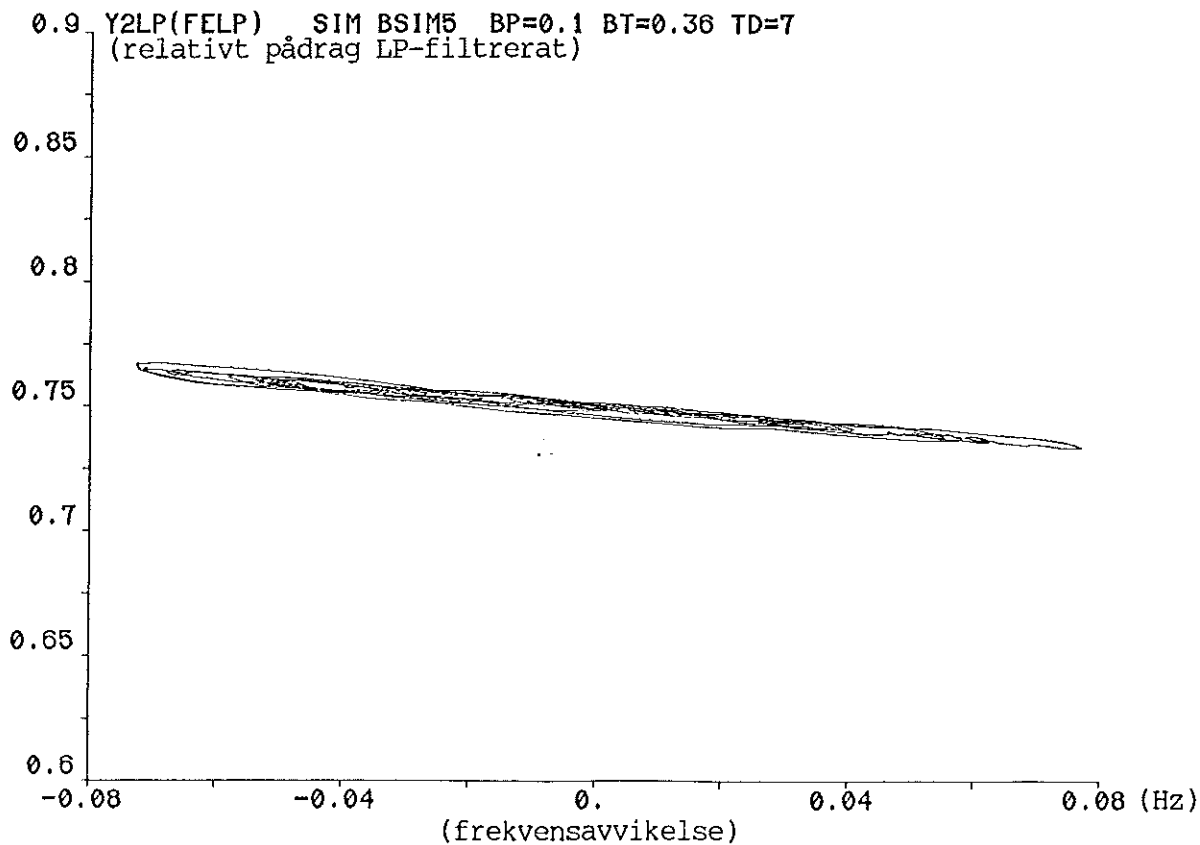
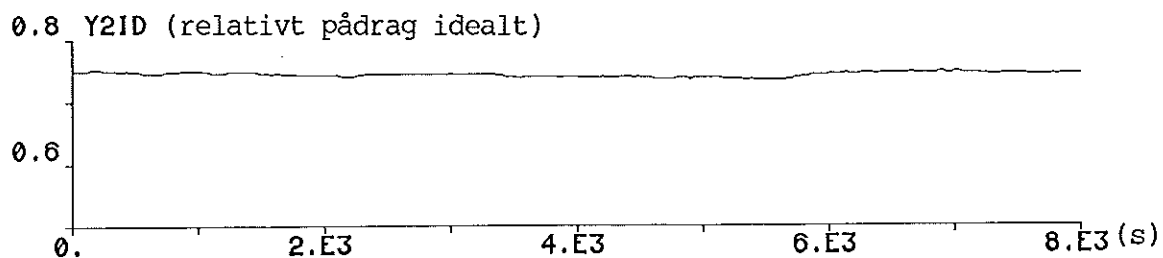
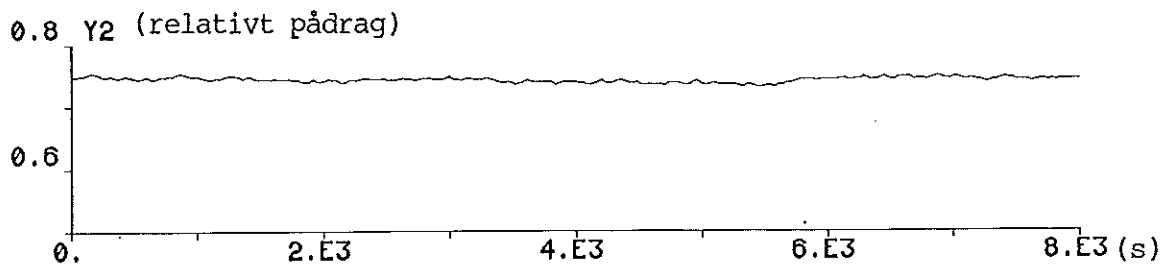
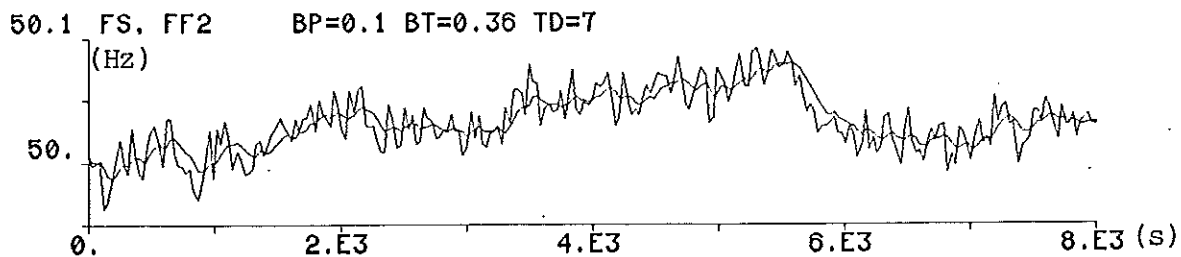


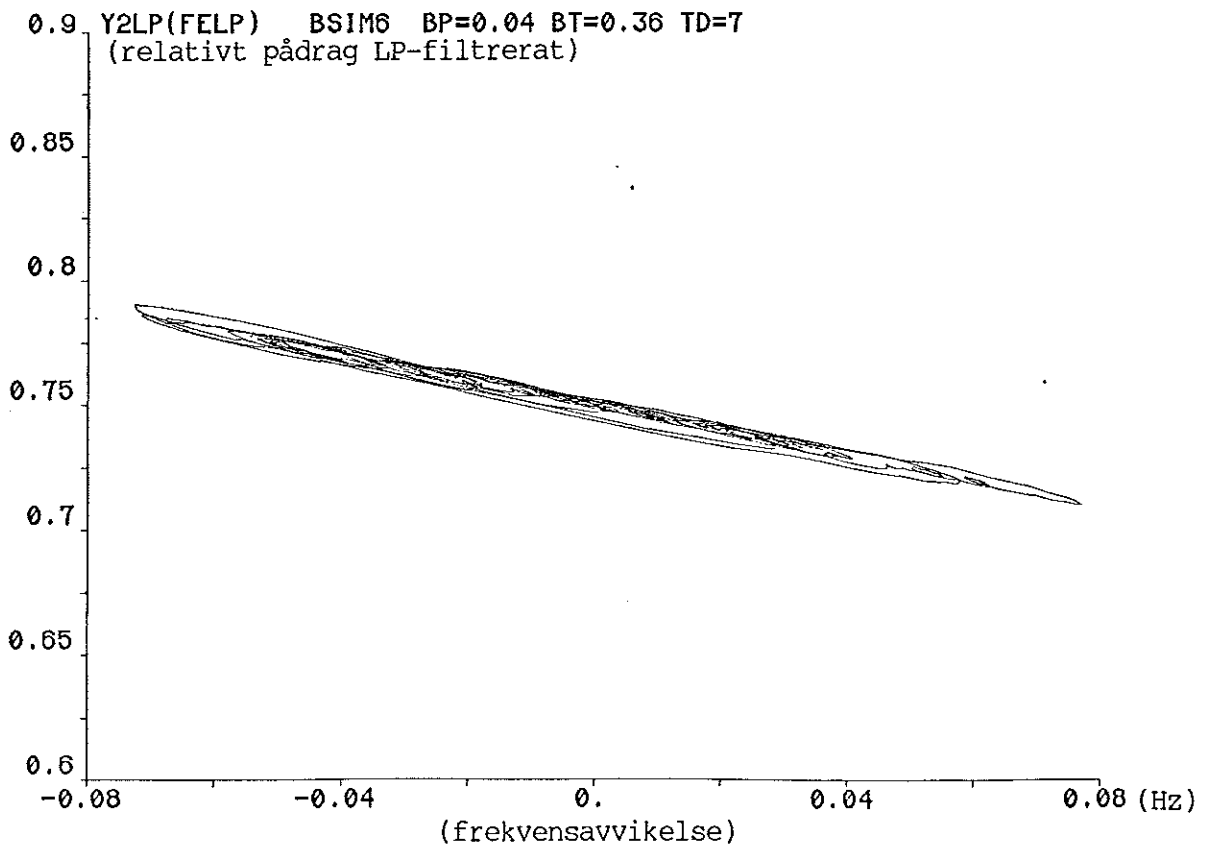
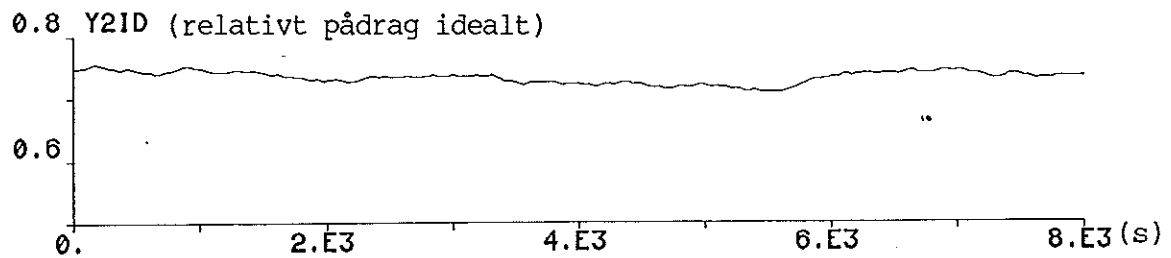
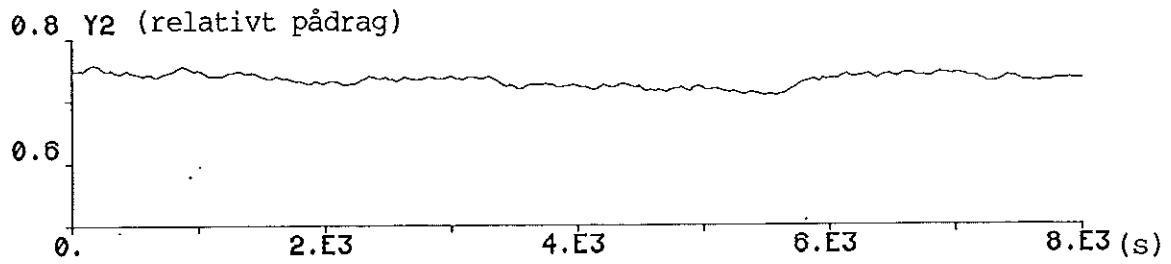
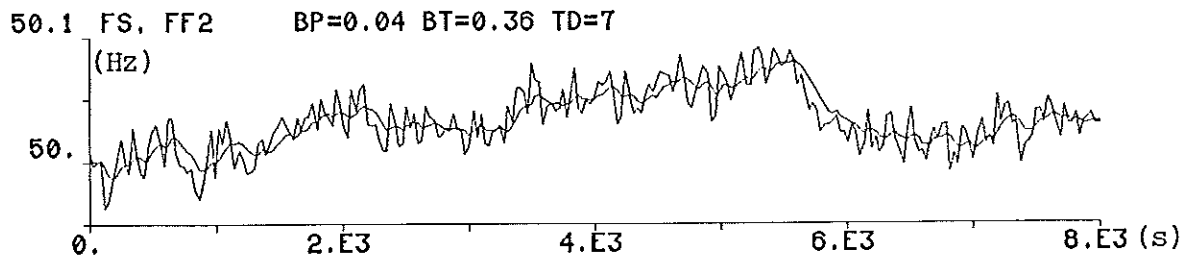




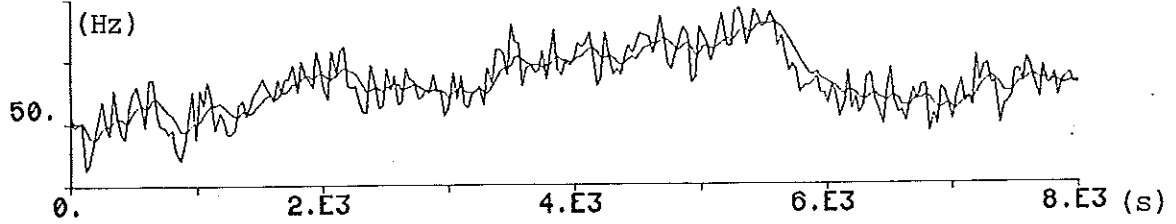




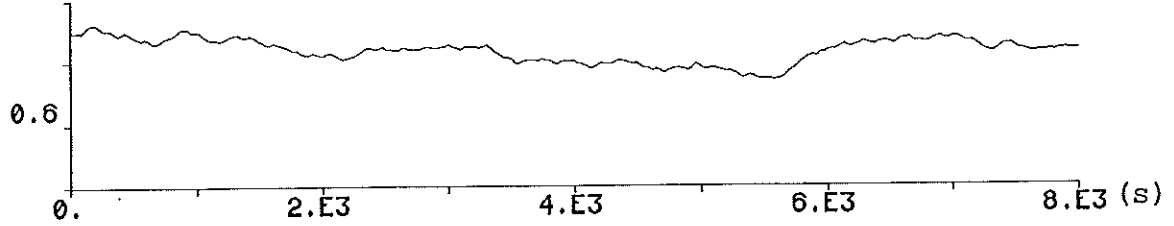




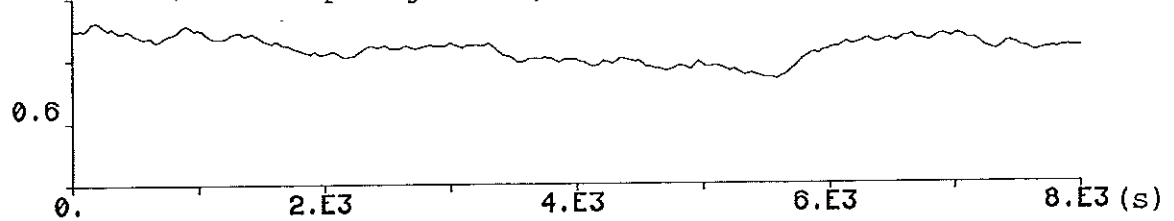
50.1 FS, FF2 BP=0.02 BT=0.36 TD=7



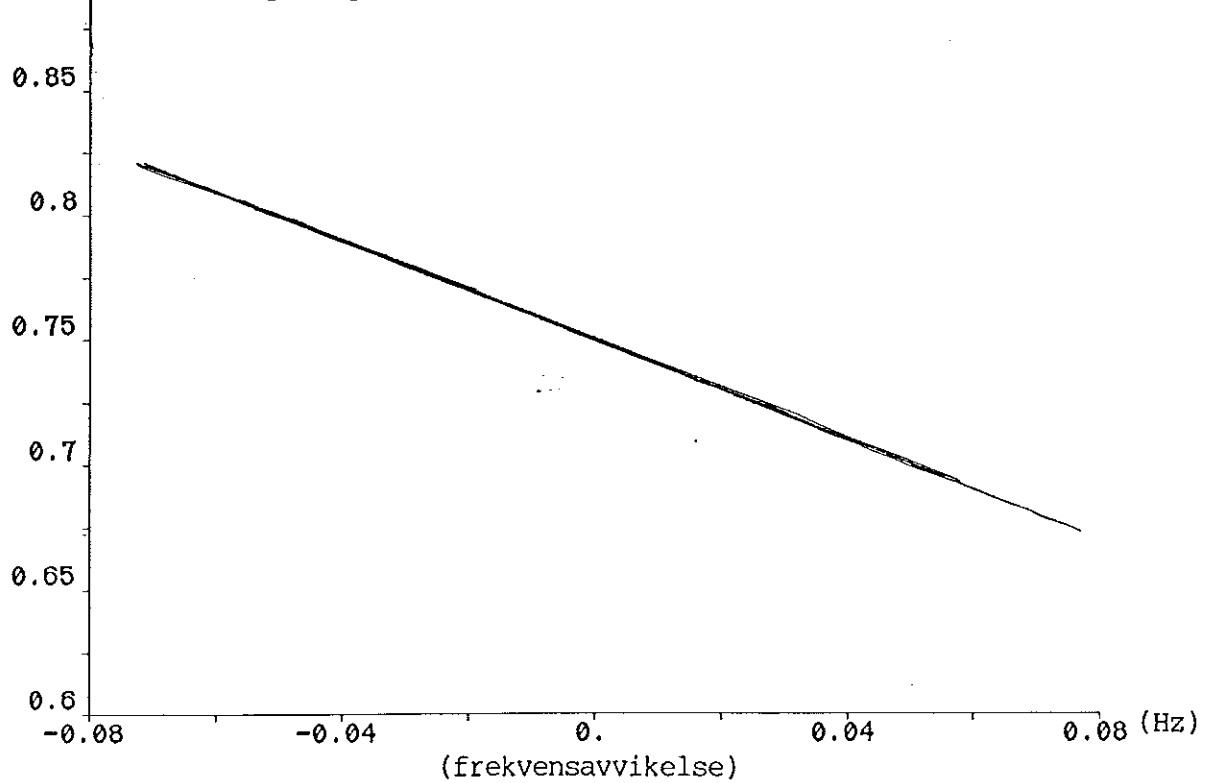
0.8 Y2 (relativt pådrag)

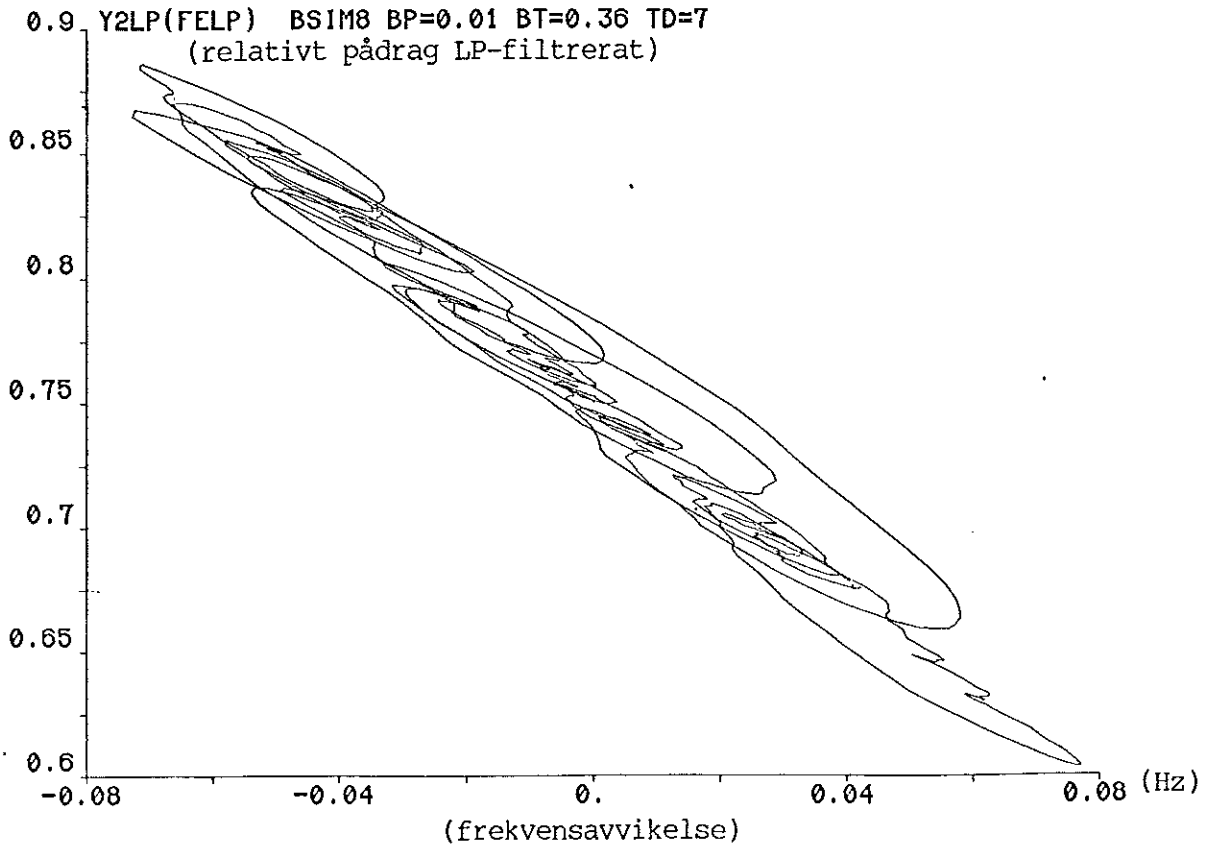
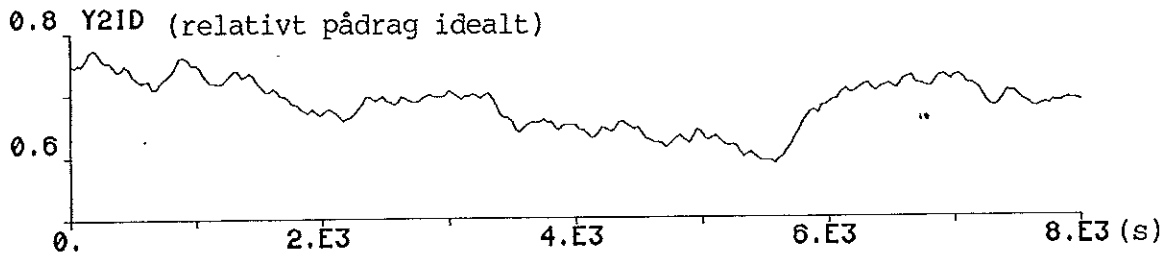
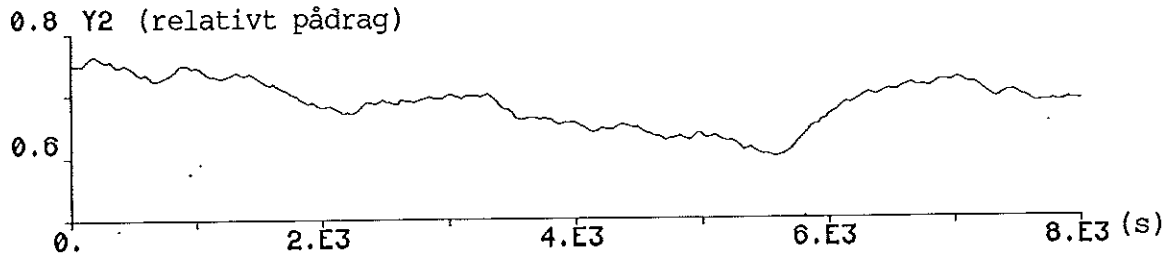
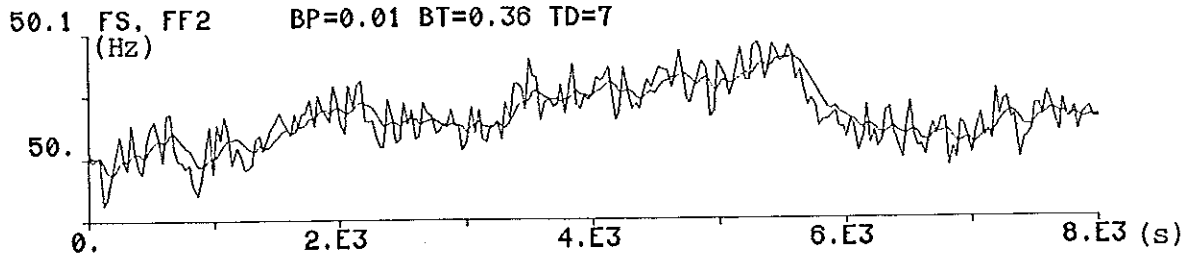


0.8 Y21D (relativt pådrag idealt)

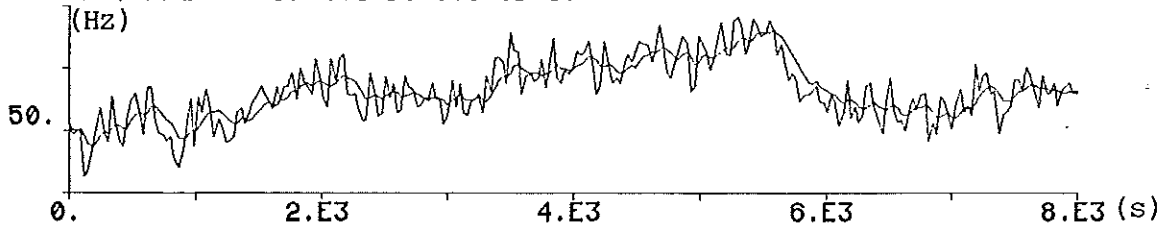


0.9 Y2LP(FELP) BSIM7 BP=0.02 BT=0.36 TD=7
(relativt pådrag LP-filtrerat)

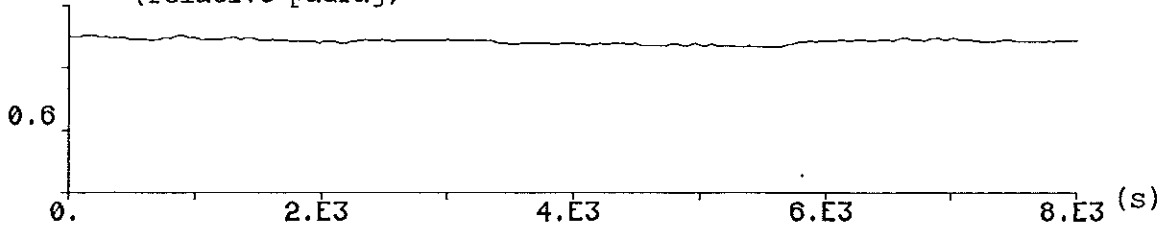




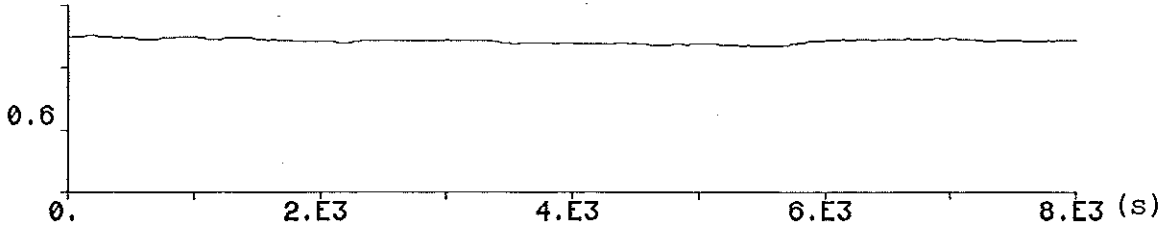
50.1 FS, FF2 BP=0.1 BT=0.6 TD=10
(Hz)



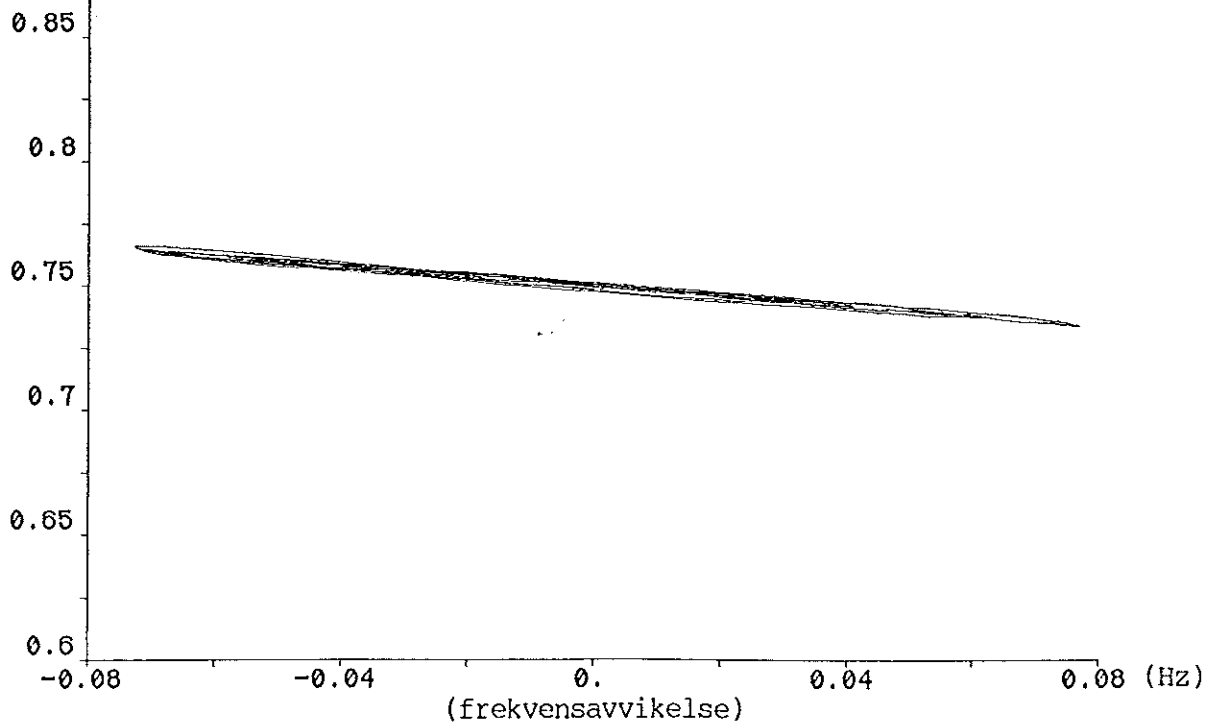
0.8 Y2 (relativt pådrag)

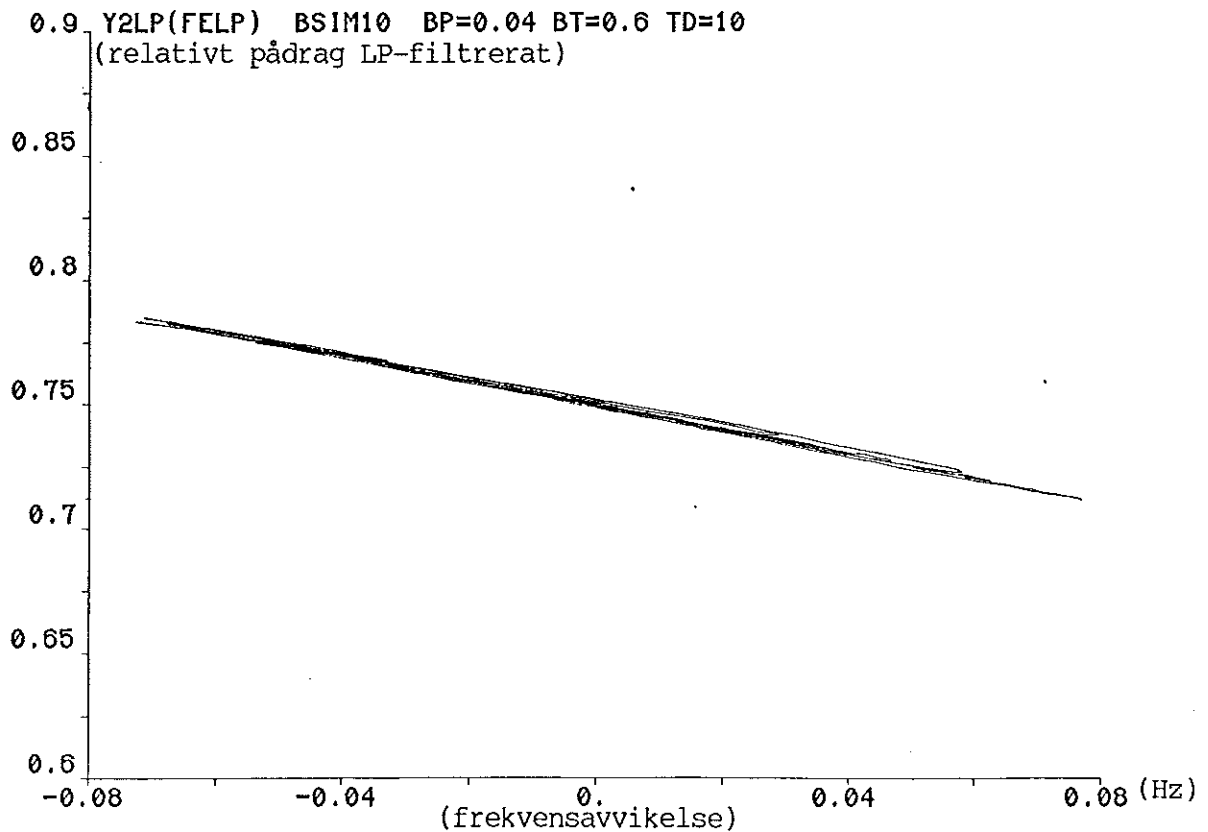
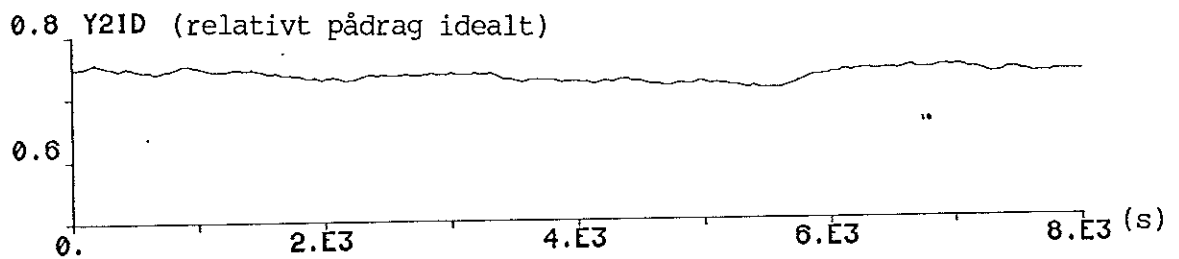
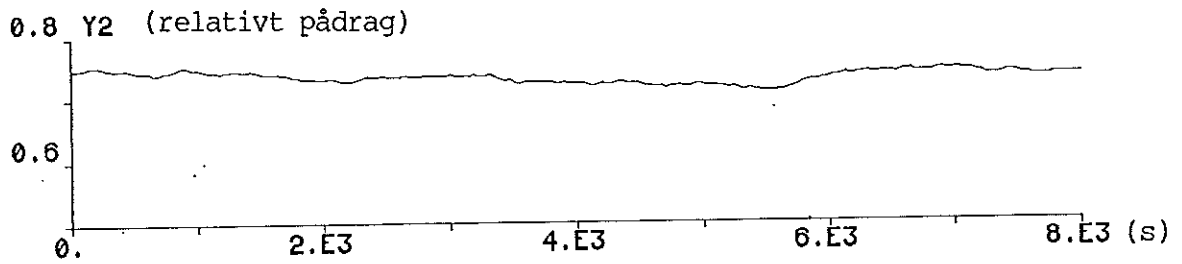
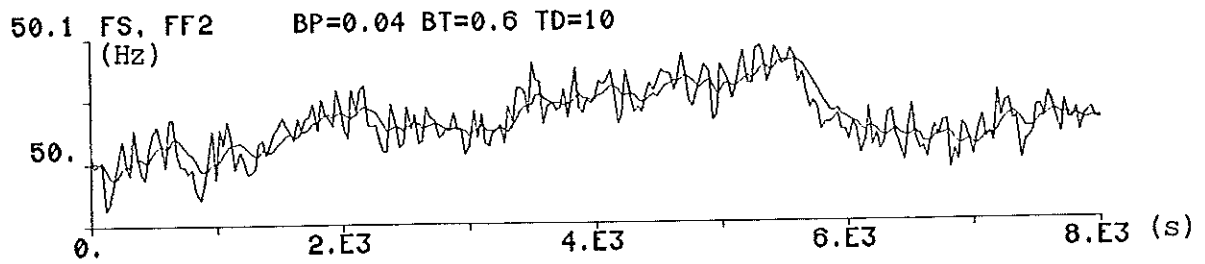


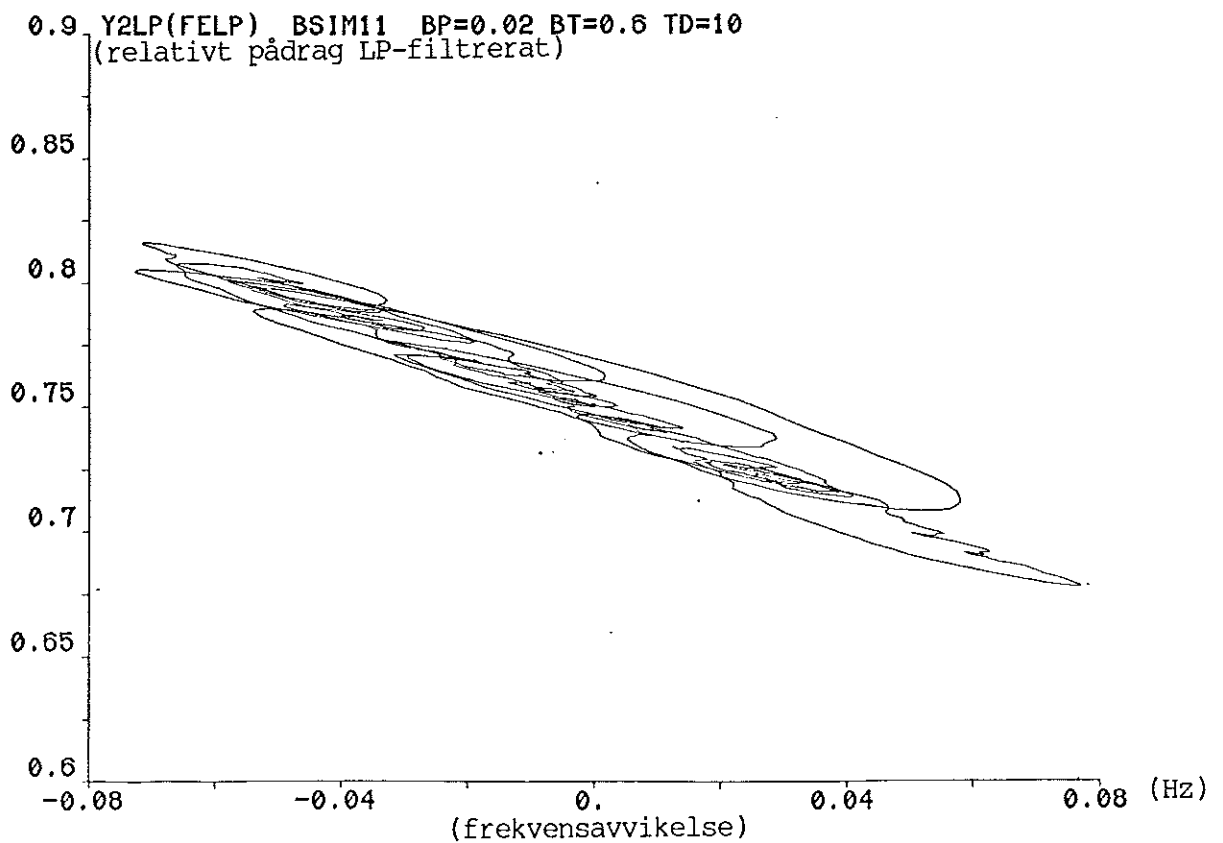
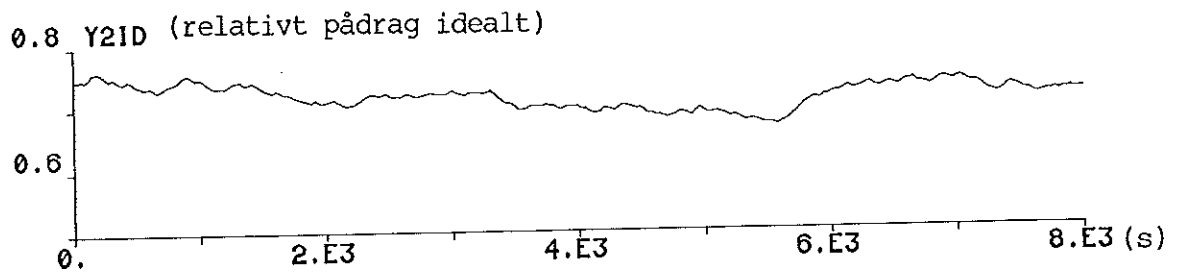
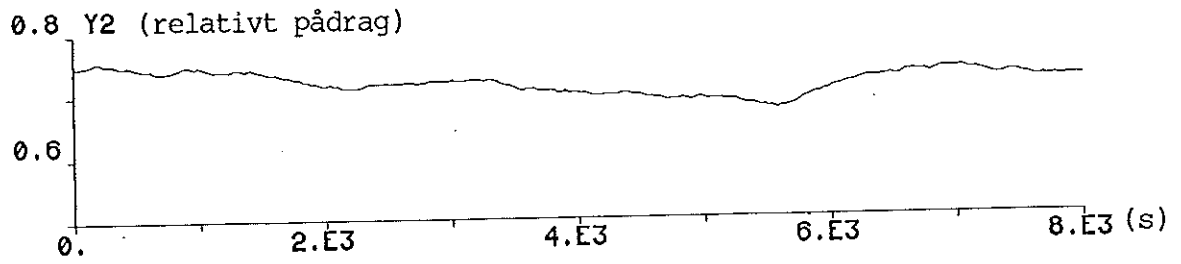
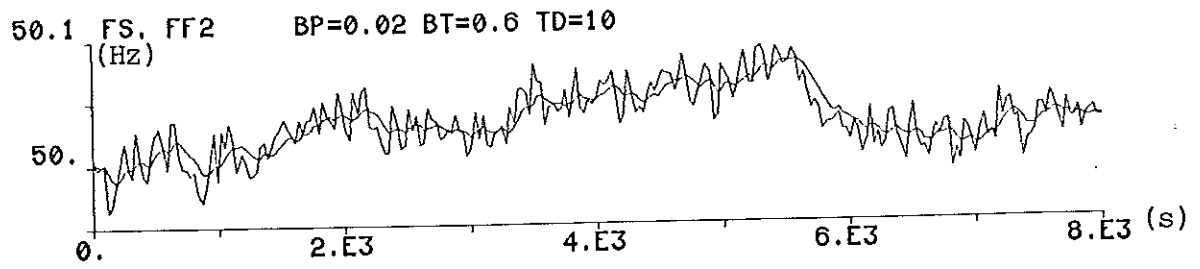
0.8 Y2ID (relativt pådrag idealt)

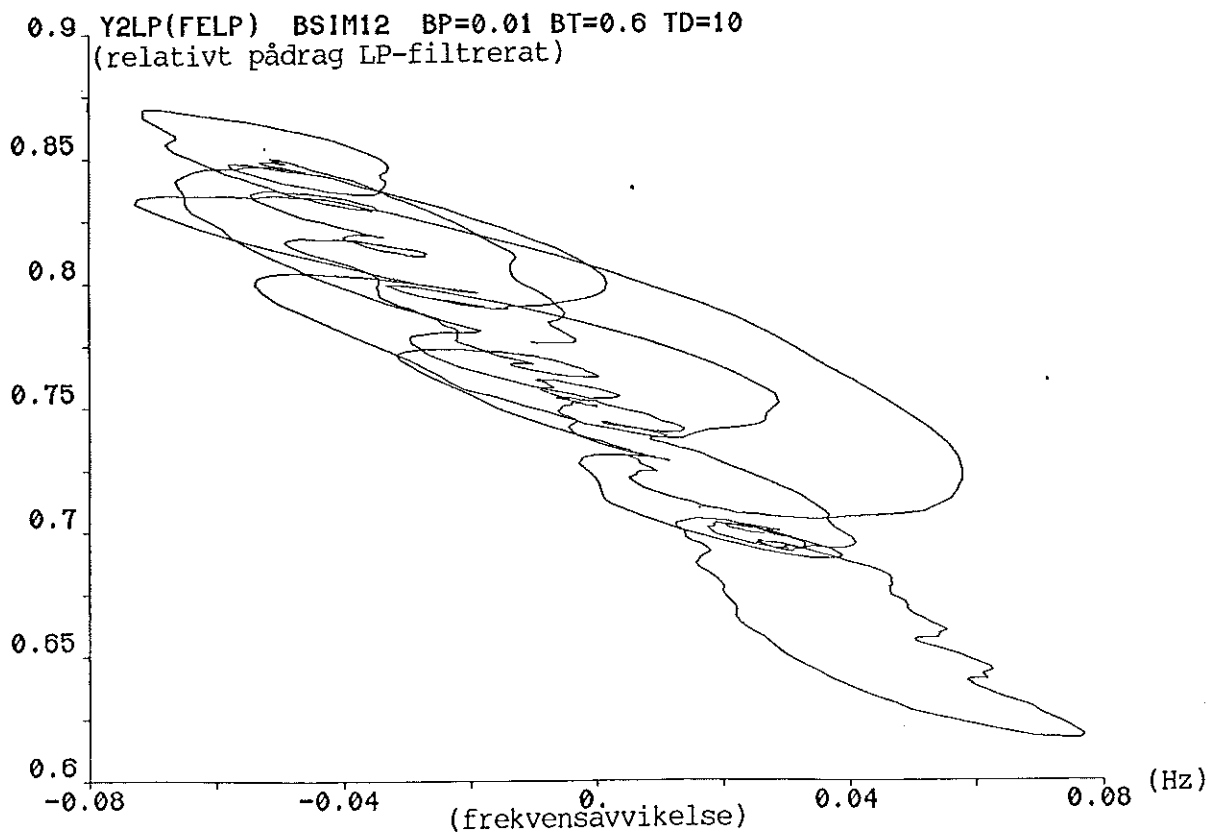
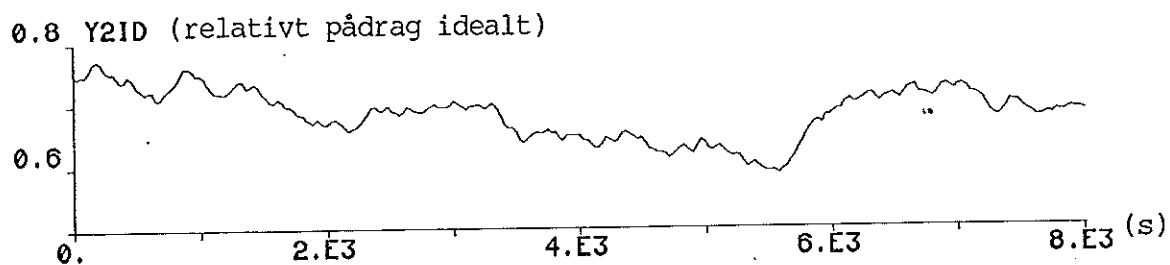
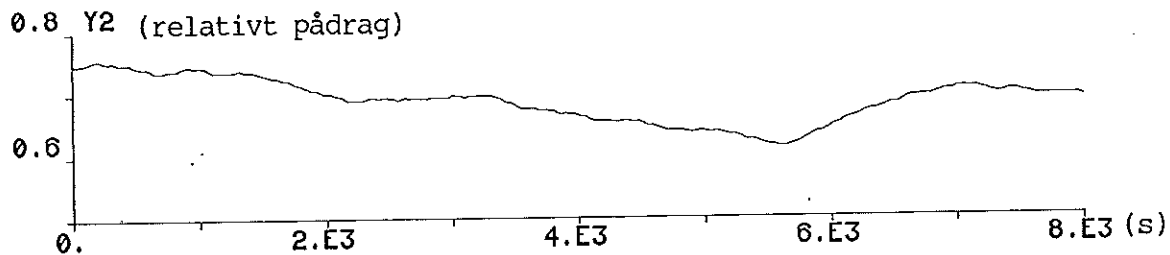
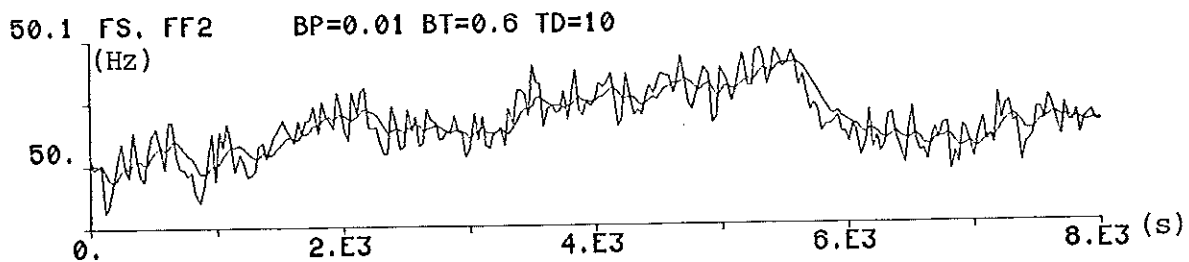


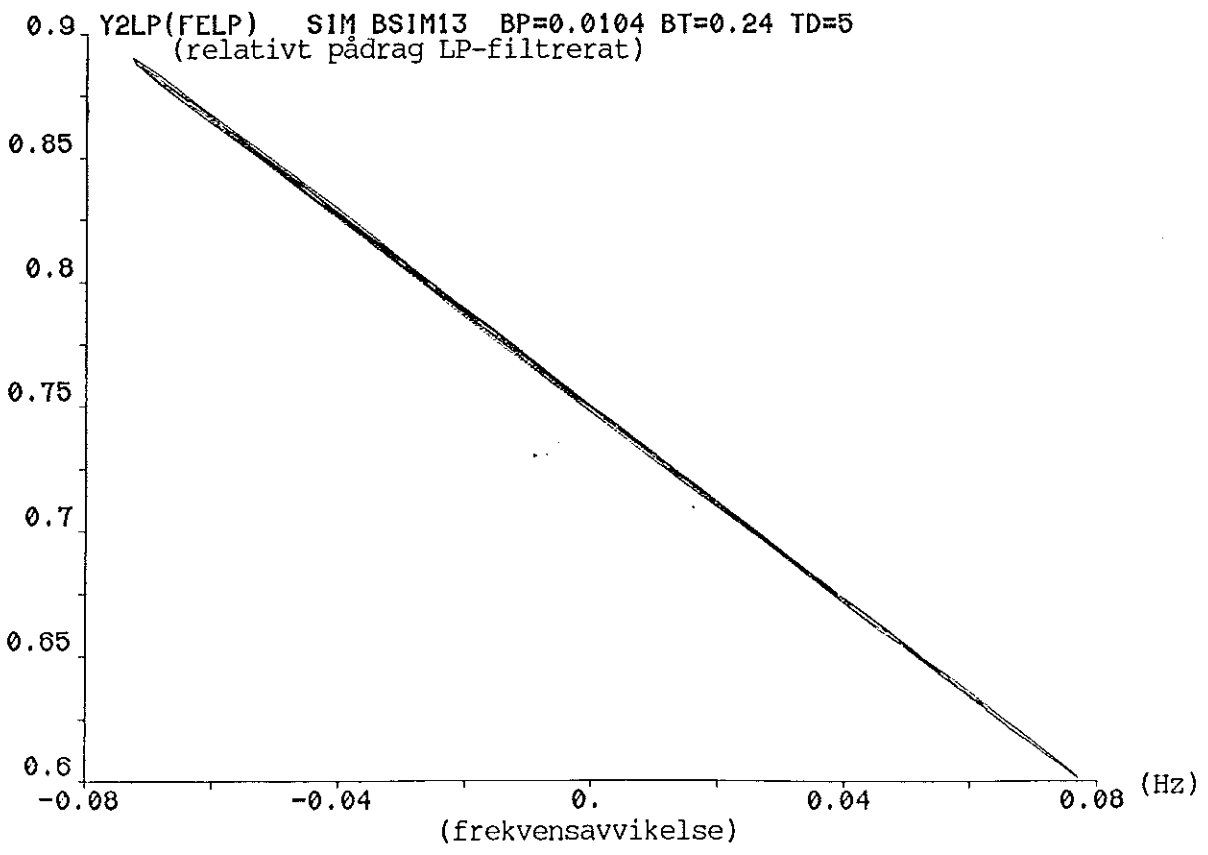
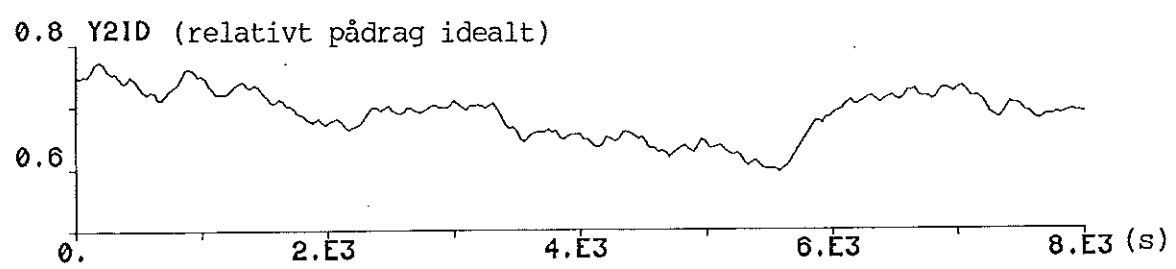
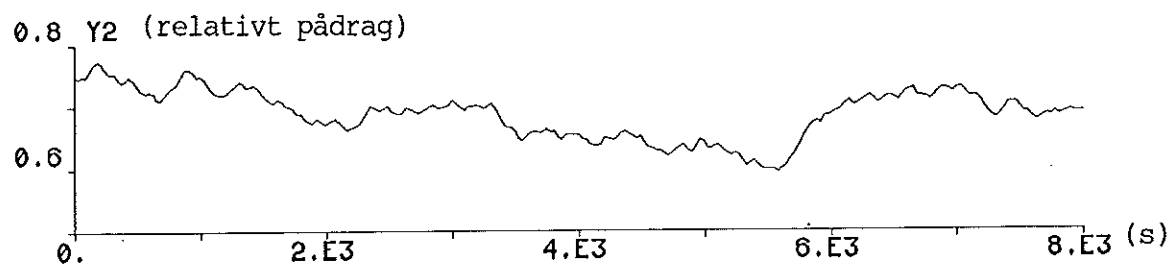
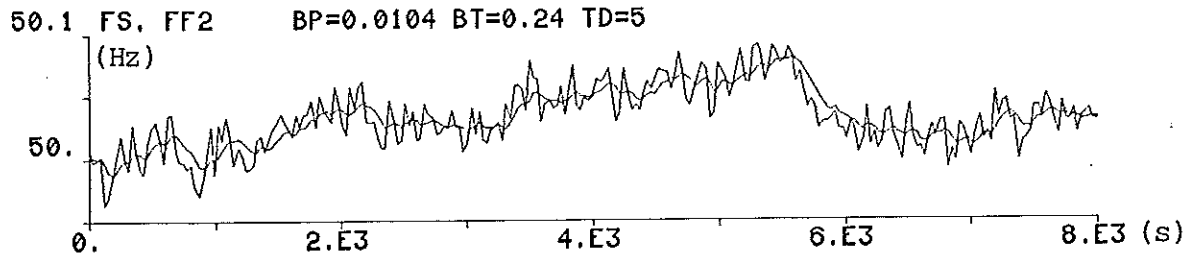
0.9 Y2LP(FELP) BSIM9 BP=0.1 BT=0.6 TD=10
(relativt pådrag LP-filtrerat)

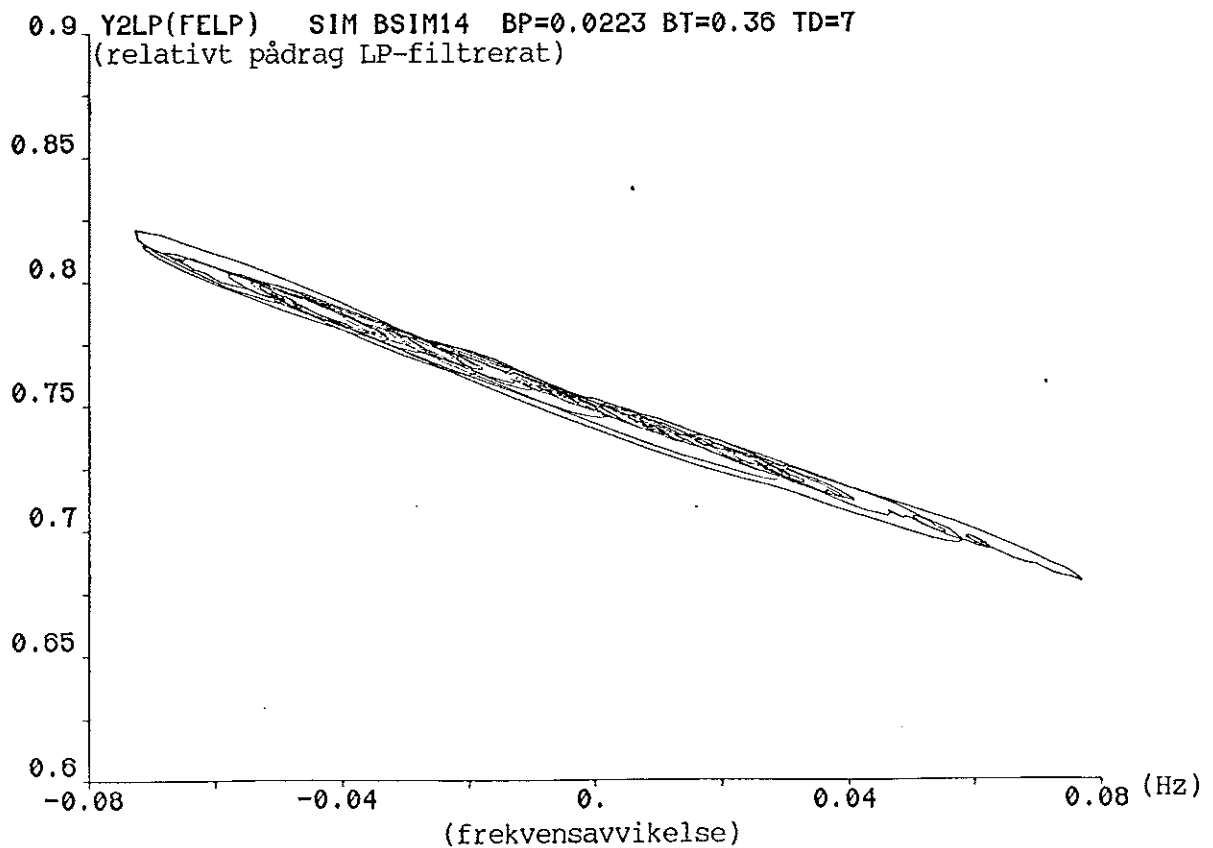
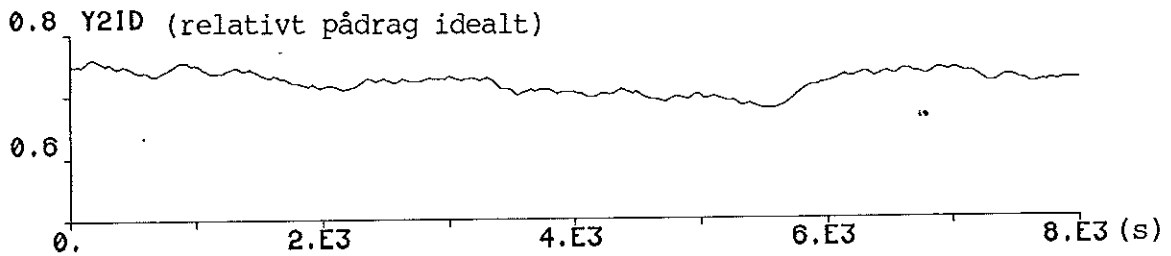
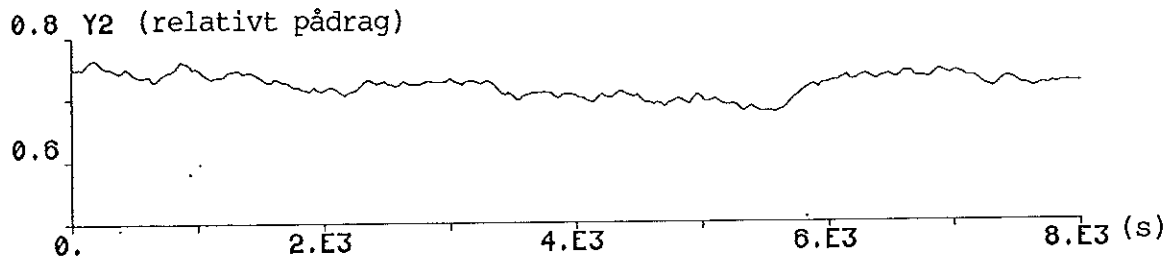
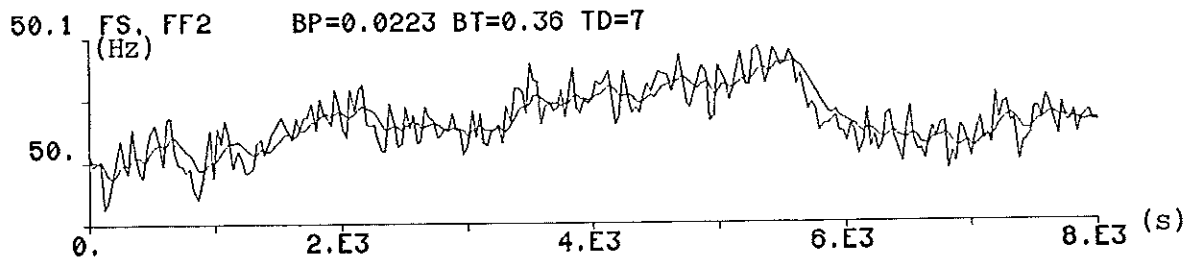


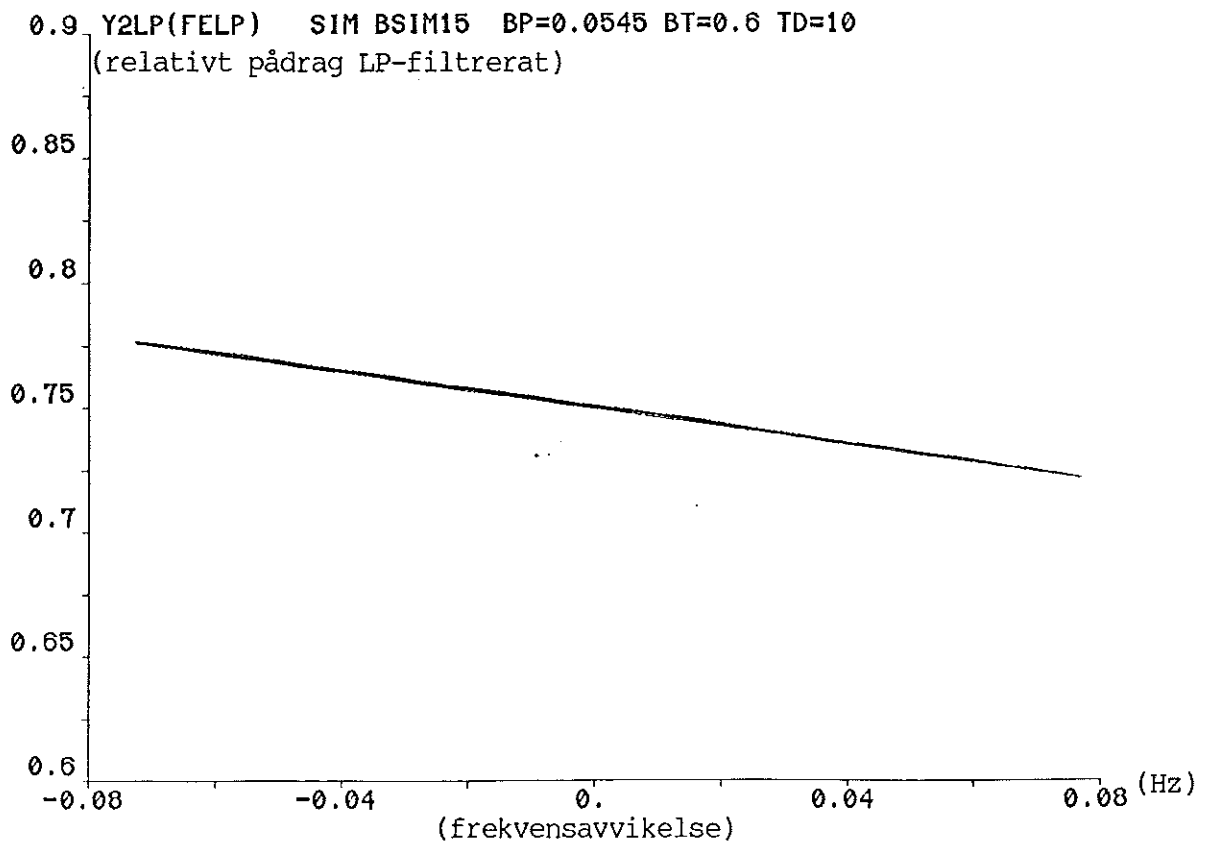
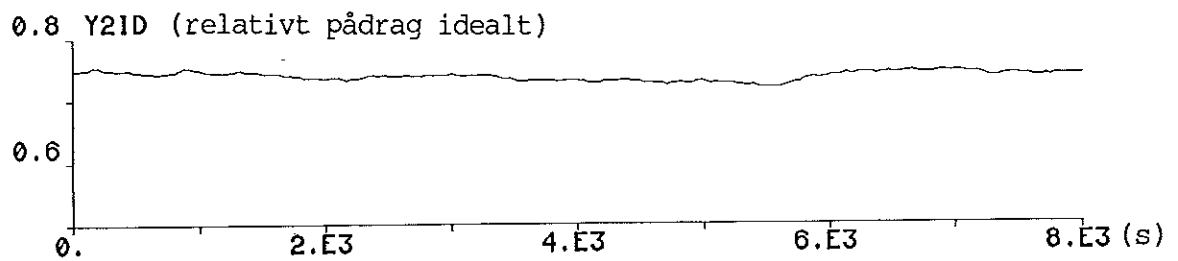
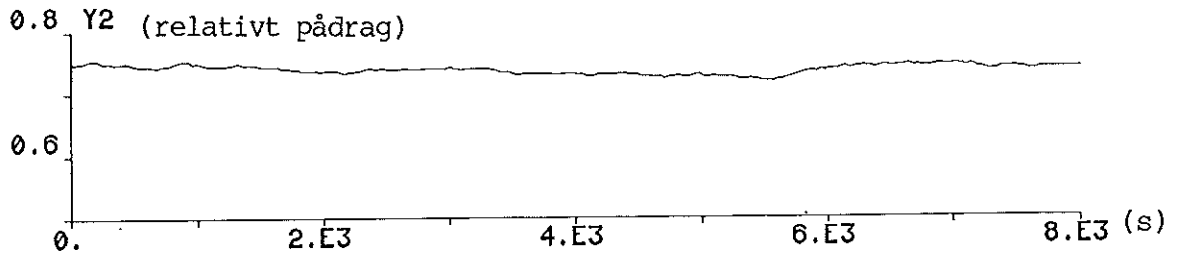
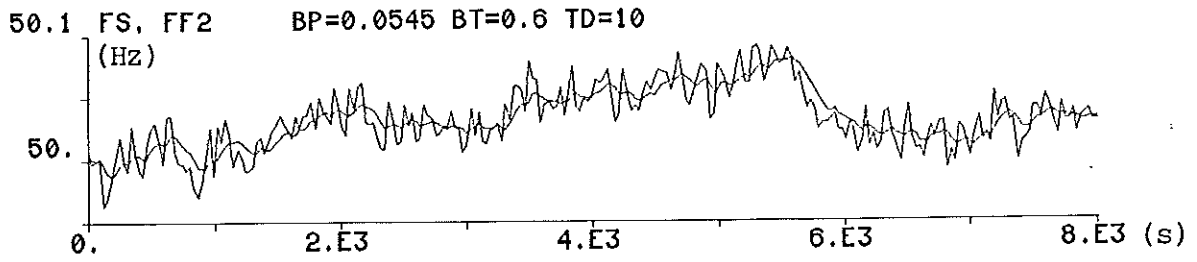












Tabell 1. Simuleringsresultat

Sim. nr.	bp	bt	Td	Tidsk. (s)	Rstat (%/Hz)	Rmät (%/Hz)	MET (%slag/h)	MET/Rmät	RHO	GAIN
1	0.1	0.24	5	17	20	21	33	1.551	0.952	1.018
2	0.04	0.24	5	35	50	52	50	0.950	0.975	1.023
3	0.02	0.24	5	65	100	102	62	0.609	0.992	1.020
4	0.01	0.24	5	125	200	200	75	0.376	1.000	0.999
5	0.1	0.36	7	32	20	21	23	1.120	0.970	1.021
6	0.04	0.36	7	70	50	51	31	0.616	0.993	1.018
7	0.02	0.36	7	133	100	99	38	0.379	1.000	0.996
8	0.01	0.36	7	259	200	182	44	0.243	0.985	0.940
9	0.1	0.6	10	70	20	21	14	0.674	0.992	1.018
10	0.04	0.6	10	160	50	48	18	0.371	0.998	0.984
11	0.02	0.6	10	310	100	97	20	0.211	0.977	0.920
12	0.01	0.6	10	610	200	179	23	0.129	0.928	0.822
13	0.0104	0.24	5	120	192	193	74	0.386	1.000	1.001
14	0.0223	0.36	7	120	90	91	37	0.402	1.000	1.001
15	0.0545	0.6	10	120	37	38	16	0.437	1.000	1.001

Grund-
inställ-
ningar

Optimala
inställ-
ningar

REFERENSER

Turbinregulator FRVV 103, ASEA, Broschyr KK 83-101 (1969)

Automatic Generation Control of a Power System, ASEA, Technical Memorandum 11349 (1973)

Elmqvist H: SIMNON-- An interactive simulation program for nonlinear systems, Department of Automatic Control, Lund, Institute of Technology (1975)

Glad T, Ljung L: Reglerteknik, Studentlitteratur (1981)

Karlsson B: Reglerstyrka och momentan störningsreserv inom Sverige, SYDKRAFT, Meddelande DK-8204-39 (1982)

Lindahl S: Modeller för reglersystem för generator, turbiner, pannor och reaktorer, Seminarium KTH, Kraftsystemets dynamik och kontroll (1976)

Lindahl S, Peterson B: Registrering av reglerstyrkorna i Vietas, Seitevare, Messaure och Letsi kraftstationer, VATTENFALL, PM DS-210 (1976)

Lindahl S: Behovet av frekvensreglerreserv och reglerstyrka, SYDKRAFT; Delrapport DS-8107-03 (1981)

Lindahl S: Frekvenshållning inom NORDEL-systemet, särtryck ur NORDEL:s årsberättelse (1983)

Riktlinjer för frekvenshållning, NORDEL/NOSY-rapport (1981)

Time response for frequency-activated operating reserves in the NORDEL network, NORDEL/NOSY-rapport till CIGRE/IFAC symposiet Florens (1983)

Wedeen A, Eskilson C-M: Frekvensreglering och lastfördelning i Sverige, Statens Vattenfallsverk, Meddelande SV 1300 (1962)

Wieslander J: IDPAC Commands Users Manual, Department of Automatic Control, Lund, Institute of Technology (1980)

Aström K J; Reglerteori, Almqvist & Wiksell (1976)

Aström K J: A SIMNON Tutorial, Department of Automatic Control, Lund, Institute of Technology (1985)