



LUND UNIVERSITY

Kontaktmöte med kraftindustrin vid Institutionen för Reglerteknik, LTH den 17-18 oktober 1968

Åström, Karl Johan

1973

Document Version:
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Åström, K. J. (1973). *Kontaktmöte med kraftindustrin vid Institutionen för Reglerteknik, LTH den 17-18 oktober 1968*. (Technical Reports TFRT-7045). 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

TFRT-7045

KONTAKTMÖTE MED KRAFTINDUSTRIEN VID
INSTITUTIONEN FÖR REGLERTEKNIK,
LTH den 17 - 18 oktober 1968

K. J. Åström

Report 7303 (C) january 1973
Lund Institute of Technology
Division of Automatic Control

TILLHÖR REFERENSBIBLIOTEKET
UTLÄNAS EJ

Kontaktmöte med kraftindustrin vid institutionen för Reglerteknik,
LTH den 17-18 oktober 1968

Sammanfattning av föredrag och diskussioner

Deltagare: Civ.ing. Nils-Erik Claesson, ASEA
Tekn.lic. Åke Kolm " "
Civ.ing. Bertil Thorén " "
" Knut Almström " "
" Olov Norinder, AB Atomenergi
Siv.ing. Per Bruarøy, IFA Kjeller
Civ.ing. Kjell Norbeck, Sydkraft
" Hans Pettersson " "
" Gunnar Tedestål " "
" Pekka Langer, Vattenfall
" Torsten Spanne " "
" Lennart Thyrén " "
" Åke Ölvegård " "
" Gunnar Stackenäs " "

från institutionen:

prof. Karl-Johan Åström
lektor Gustaf Olsson
forskn.ing. Karl Eklund
" Krister Mårtensson
" Ivar Gustavsson
ass. Johan Wieslander
" Björn Wittenmark
" Per Hagander
" Bo Leden
" Ulf Borisson
forskn.ing. Olle Fjelner

Innehåll

1. Prof. K-J Åström: Presentation av de senaste (10-20) årens utveckling inom reglertekniken.
2. Modeller för enskilda kraftstationer
 - 2.1 Civ.ing. G. Tedestål, Sydkraft: Reglertekniska problem i ångkraftverk.
 - 2.2 Civ.ing. K. Eklund, LTH: Numeriskt modellbygge för domen i en ångpanna.
 - 2.3 Civ.ing. O. Norinder, AB Atomenergi: Olika modeller för kärnkraftverk. Metoder för beräkning av rumsstabilitet.
3. Stabilitet hos stora kraftnät
 - 3.1 Civ.ing. K. Norbeck, Sydkraft: Krav från nätet vid bortfall av kraftstationer.
 - 3.2 Civ.ing. A. Ölvegård, Vattenfall: Stabilitetsproblem på elkraftnät.
 - 3.3 Civ.ing. P. Langer, Vattenfall: En metod för att beräkna statisk stabilitet i stora kraftnät.
4. Produktionsplanering, drift- och samkörningsfrågor
 - 4.1 Civ.ing. H. Pettersson, Sydkraft: Optimerings- och övervakningsmetoder för elektriska kraftsystem.
 - 4.2 Civ.ing. L. Thyren, Vattenfall: Produktionsplanering inom kraftindustrin.

1. K-J Åström: Presentation av det senaste decenniets utveckling inom reglertekniken

Professor Åström inledde samtalen med att i korthet presentera den nya teori inom reglertekniken, som utvecklats under det sista decenniet. Året 1957, det år som Sputnik sändes upp, kan i många avseenden betecknas som en milstolpe i reglertekniken. Efter 1957 har t.ex. antalet publicerade artiklar inom reglerteorin ökat närmast exponentiellt.

De väsentligaste områden som berördes var optimeringsteorin. Bakom denna ligger den klassiska variationskalkylen som senare utvecklats vidare av Pontryagin m.fl. till maximumprincipen. Den dynamiska programmeringen, vars främste föregångare är Richard Bellman, publicerades först 1957 och har senare utvecklats ytterligare, framför allt för att bättre anpassa tekniken till datamaskinernas minnesbehov.

Referenser: Lee E.B., Marcus L.: Foundations of Optimal Control Theory, Wiley 1967
Athans M., Falb P.: Optimal Control, McGraw-Hill 1966.

2. MODELLER FÖR ENSKILDA KRAFTSTATIONER

2.1 G. Tedestål: Reglertekniska problem i ångkraftverk

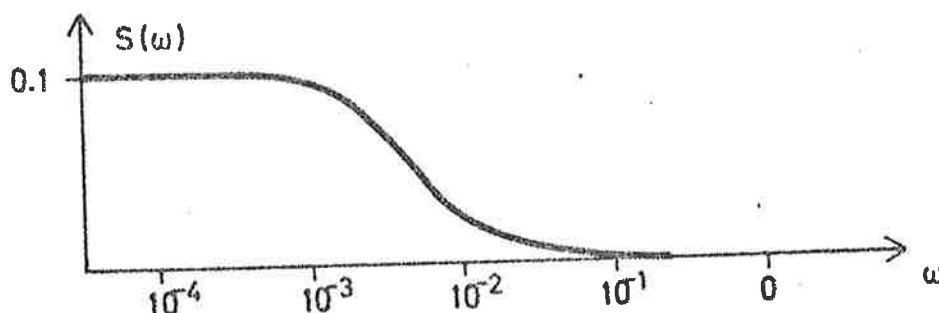
Målsättning: Att i varje ögonblick producera en effekt som motsvarar den aktuella belastningen.

Huvudfråga: Vilka lastvariationer skall beaktas vid dimensionering av reglerutrustning. Man har dels att räkna årsvecko- och dygnvariationer, dels variationer av mer transient art. De förra bemästras genom långsiktig planering, medan de senare på grund av sin snabba karaktär måste klaras av installerade regulatorer (frekvensregleringen).

Låt reglereffekten P_r vara en stokastisk process definierad i intervallet $\{0 < t < T\}$ (den beror starkt av prognosmetoderna).

$$\begin{aligned} \text{Då gäller} \quad P_r &= P(z) & 0 < t < T \\ P_r &= 0 & \text{f.ö.} \end{aligned}$$

Reglereffektens frekvensspektrum $S(\omega)$ blir enligt figur nedan:

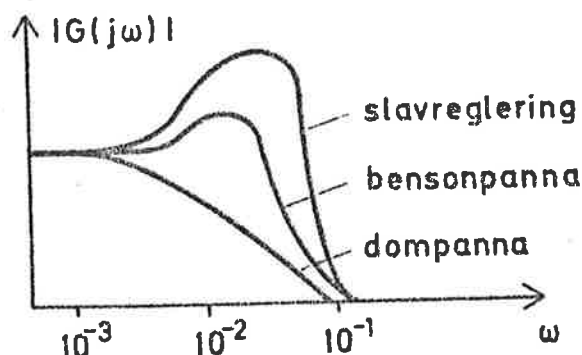


Endast lastvariationer med en periodtid mellan 10 och 100 min är intressanta ur reglerteknisk synpunkt. Snabbare lastvariationer regleras ut av nätets svängmassor, medan långsammare variationer klaras av genom långsiktig planering.

Olika kraftverk klarar lastvariationerna inom det kritiska frekvensskeendet olika bra. I figuren nedan visas karakteristiken

$$|G(j\omega)| = \frac{\Delta\omega/p_0}{\Delta p_{bör}/p_0}$$

där Δp är effektändring och $\Delta p_{bör}$ är börvärdesändring, båda för några olika typer av kraftverk:



Dygnsvariationen

I dag klarar man dygnsvariationerna genom att låta (kärnkraftverken och) vattenkraftverken och ångkraftverken samverka till det effekttillskott som fordras under dagen.

Man ställs då inför frågan om ångkraftverken skall ställas av under natten. Sydkraft gör så exempelvis med sitt kraftverk i Karlshamn. Detta förfarande ger problem, ty man måste känna kraftverkets utgångstillstånd vid uppstartningen på morgonen.

Exempelvis må nämnas att turbinen i stort sett behåller sin temperatur under avställningen, medan pannans tryck sjunker till hälften på 8 tim. Ångtemperaturen måste således höjas och anpassas till turbinens temperatur innan kraftverket kan startas upp.

Allmänt

En ångturbin har mycket goda regleregenskaper. Denna representerar till skillnad från en vattenturbin endast ett mycket svagt min-fas system.

Vid uppstartning av kraftverket i Karlshamn tvingas man koppla om mellan 3 olika reglerutrustningar innan man når fulllast. Denna reglerutrustning har kostat 4 milj.kr.

Sammanfattning av några problem vid ångkraftverk

Starten är ett avancerat optimeringsproblem

Mättekniska problem. Att t.ex. mäta temperaturen i överhettaren då ej någon strömning genom den finnes.

Belastningsvariationer. I turbinen måste lasten minskas om temperaturskillnaden mellan metall och ånga är för stor. Motsatta kravet gäller för pannan, dvs eldningen måste ökas om temperaturdifferensen är för stor.

Diskussion

Tedestål: Den visade frekvenskurvan beror starkt av konstruktionsparametrar liksom av bränsle och eldningsreglering.

Eklund: Hur påverkas den av storleken på domen?

Tedestål: I viss mån kan frekvenskurvan påverkas.

Åström: Hur tar man reda på frekvenskurvan?

Tedestål: Genom erfarenhetsmässiga uppskattningar samt mätningar i efterhand

Tedestål: Vid t.ex. start ändras ju belastningen drastiskt för ångkraftverket. Reglerorganen måste kunna arbeta inom hela detta område och stora krav ställes därför på dem.

Kanske vore adaptiv reglering av t.ex. temperaturen möjlig?

Åström: Hur har dessa problem lösts i Karlshamn?

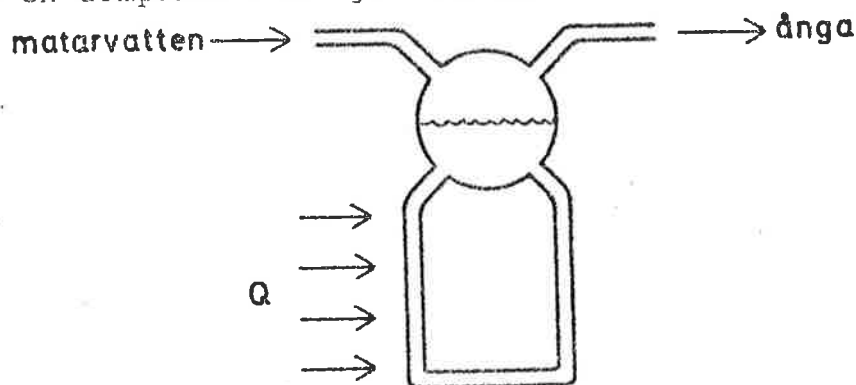
Tedestål: Regulatorerna kopplas om när belastningen ändras.

Olsson: Hur många omställningar måste göras?

Tedestål: Ibland ställs de efter en i förväg uppgjord tidsfunktion, ibland språngvis. Ofta ställer man om både börvärde och integrationstid.

2.2 K. Eklund: Numeriskt modellbygge för domen i en ångpanna

Inledningsvis berördes de metoder som kommit till användning i Tyskland (Stuttgart, prof. Quack) och i England. Slående är den skillnad som föreligger i den använda modellens ordning. Medan man i Tyskland använder blockschema modellen av ca 120:de ordningen, använder man i England differentialekvationsmodellen som efter reduktion är av mindre än 10:de ordningen. Tyskarna delar in pannen i komponenter och skriver upp alla fysikaliska grundekvationer för var och en av dessa. Man lineariserar, laplacetransformerar och får till slut fram ett blockschema. Den mest relevanta delen av modellen plockas så ut, varefter man i princip sätter på PI-regulatorer för styrningen. Engelsmännen å andra sidan reducerar sina ekvationer från ca 30 st till 7 à 8 st och använder så styrlagar som grundar sig på kriteriefunktioner. Den av Eklund använda metod för modellbygge utnyttjar datamaskin i största möjliga utsträckning och betraktar dynamiken för en ångpanna med självcirkulation, se figur.



Metodiken är följande: Ställ upp grundekv för systemet med hjälp av konstruktionsdata. Med hjälp av datamaskinprogram sökes den stationära lösningen varefter ekvationerna lineariserar kring denna. Även införande av tillståndsvariabler och överföring av ekvationerna på standard form:

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

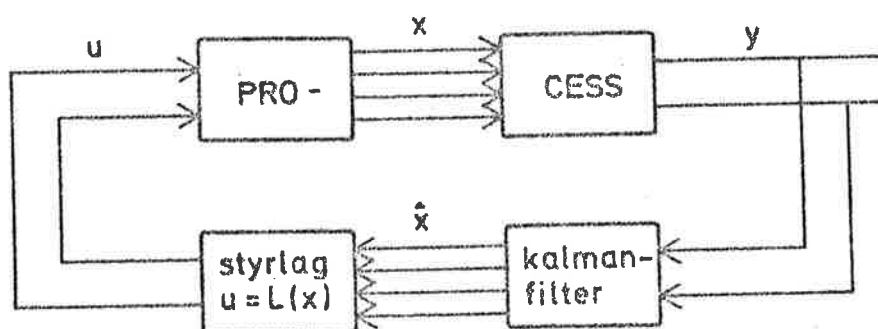
$$y = Cx + Du$$

sker i programmet. Antalet tillståndsvariabler dvs modellens ordning kan väljas före genomlöpandet av programmet. Likaså kan tillses att de införda tillståndsvariablerna får fysikalisk tolkning som tryck, temperatur, domnivå, ångkvalitet etc. Det visar sig att ordningen 5 på modellen räcker för att beskriva systemet.

För att konstruera styrlagar för systemet används linjärkvadratisk optimering, dvs kriteriefunktionen är

$$V = \int (x^T Q_1 x + u^T Q_2 u) dt$$

Skattningar av tillståndsvariablerna erhålles ur ett Kalmanfilter.



Specifikt för denna syntesmetod är bl.a.

1. Eljest svårsmätbara tillståndsvariabler i systemet fås på köpet i Kalmanfiltret.
2. Med denna syntesmetod kringgås de svårigheter med fler-variabla system som består i korskopplingar etc.
3. De val som en konstruktör alltid mer eller mindre explicit är tvungen att göra består här i att välja matriserna Q i kriteriefunktionen V .

Diskussion

Tedestål: Vilka språng på insignalerna är överhuvud taget rimliga i detta sammanhang? Ofta anser man praktiska gränsen vara 10%. Dornivån är man angelägen att hålla konstant, däremot ej så farligt med trycket.

Aström: Vi vore i detta sammanhang glada över att kunna få göra mätningar som kan stödja den teori och de beräkningar som gjorts. Varför har tyskarna t.ex. tagit fram en modell med 130 tillståndsvariabler medan engelsmännen kan reducera liknande system till ungefär ordningen 10?

Norinder: Vilken teknik för tvåfasdynamiken har använts?

Eklund: En enda ordinär diff.ekv. Man antar här given kvalitet på ångan.

Aström: Arbetet ger en trevlig aspekt på modellbyggnad allmänt sett. Endast konstruktionsdata plockas in och ut och man får den färdiga linjära modellen. Kalmanfiltreringen ger en god uppskattning av verkliga fysikaliska storheter, varför man hela tiden får en god känsla för det fysikaliska och de väsentliga variablerna i systemet.

2.3 O. Norinder: Olika modeller för kärnkraftverk

Modell för kärnkraftverk

Härden beskrives av två diffusionsekvationer, en för de snabba neutronerna och en för de termiska neutronerna (10MeV - 0.625eV):

$$\text{div}(D^f \text{grad } \phi_f) - (\Sigma_a^f + \Sigma_r^f) \phi_f + \frac{1}{k_{\text{eff}}} ((v\Sigma_f^f) \phi_f + (v\Sigma_f^{\text{th}}) \phi_{\text{th}}) = 0$$

Det gäller $k_{\text{eff}} = 1$.

Termiska neutroner (0.625 eV - 0 eV):

$$\text{div}(D^{\text{th}} \text{grad } \phi_{\text{th}}) - \Sigma_a^{\text{th}} \phi_{\text{th}} + \Sigma_r^f \phi_f = 0$$

Reaktiviteten ρ definieras av $\rho = k_{\text{eff}} - 1$

Antager man att fluxen $\phi(r,t)$ är separabel i rum och tid får man följande punktmodell för härden.

Punktmodell:

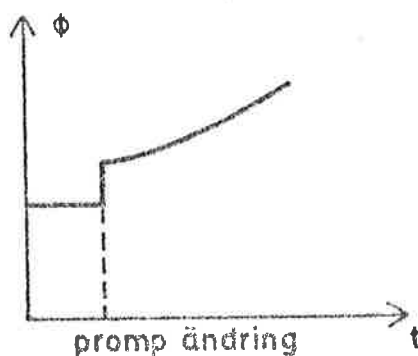
$$\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{\ell} ((1+\delta k)(1-\beta) - 1) \phi + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i$$

$$\frac{d}{dt} c_i = \frac{1}{\lambda} \beta_i \phi - \lambda_i c_i \quad i = 1, 2 - 6$$

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

Denna modell har använts i Marviken.

En ändring av reaktiviteten ger först en promp ändring i fluxen ϕ . Därefter ändras fluxen exponentiellt med en viss tidskonstant (se figur nedan)



För styrning av reaktiviteten användes stavar. Reaktiviteten kan dessutom påverkas genom ändring av

- a) Moderatortemperatur
- b) Bränsletemperatur
- c) Kylmedeltemperatur
- d) Voidinnehåll

Voiden har en stabiliserande inverkan på fluxformen i en kokarreaktor.

Marvikenmodellen transformed på normalform har följande utseende:

$$E\zeta + E\eta - sI\zeta = 0$$

$$C\zeta = D\eta$$

Systemets egenvärden s_i och egenvektorer ζ_i ges av

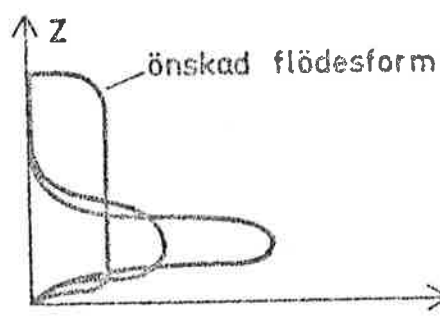
$$(E + FC^{-1}D - sI)\zeta = 0$$

Programmet EPRO beräknar egenvärdena och egenvektorererna.

För undersökning av Marvikens stabilitet har 250 olika fall studerats. Räknetiden per fall är blott 0.18 min på IBM 7044. Då löses samtliga egenvärden och egenvektorer för en 32×32 matris.

Rumsstabilitet

Vid förbränning i härden bildas xenon, som är ett starkt neutrongift. Detta ämne orsakar rumsinstabilitet. Några olika exempel på fluxfördelningar (z-led) i en cylindrisk härd framgår av figur nedan:



Rumsstabiliteten undersökes genom att

- beräkna rumstransienter
- utveckla i moder efter linjärisering av ekvationerna

I det senare fallet söker man lösningar till följande mod-system:

$$v\{E(x)vg_v(x)\} + B^2(x)g_v(x) + \mu_v^2(x)g_v(x) = 0$$

$B(x)$ anger buktighetsfördelning

$\mu_0 = 0$ ger systemets fundamentala lösning $g_0(x)$

Denna anger alltså flödets fundamentalmod.

Analog modell av Marviken

Vid AB Atomenergi har F. Reisch och T. Spanne utvecklat en analog modell för dynamiken för Marvikenreaktorn. Den innehåller väsentligen de ekvationer, rumsberoende som finnes i Norinders modell. Denna modell är framtagen för att studera transienter i tiden.

Storleken på modellen omfattar 20-30 integratorer och 100 förstärkare samt olinjära element.

Arbetsinsatsen för att göra en sådan här modell uppskattas till 1-2 månår, varav största delen har gått åt att få fram ekvationsunderlaget.

Diskussion

Åström: Kan man lita på modellen?

Spanne: Vi anser den tillräckligt noggrann för att vara underlag för dimensionering av reglersystem. En liknande modell skall göras för lättvattensystem, vilken sedan skall jämföras med experiment i testloopar och reaktorer. Den stora svårigheten här är att få de nödvändiga data som krävs från tillverkarna.

Norinder: På grund av reaktorns interna stabilitet förutser man ej några större överraskningar. Vi planerar f.n. att göra en större tredimensionell kinetikmodell.

Aström: Kommer mätningar att göras?

Norinder: Ja, omfattande program är planerat för Marviken för att verifiera modeller. Ansvariga för dessa mätningar är Åkerhielm AE, Sonesson AE och Bliseliud Studsvik, den sistnämnde främst för on-linemaskinen.

Aktuella problem av reglerteknisk art i reaktorhanteringen

1. Bridreaktorernas dynamik.

På grund av dessa reaktorerers höga anriktningsgrad blir de mycket känsliga för omstrukturering. Den korta neutronlivslängden ställer extremt höga krav på all reglerutrustning.

Man måste också söka efter mer fundamentala metoder som tar hänsyn till uppträdande icke-linariteter och omstruktureringar t.ex. vid bränslebyten.

2. Bränslebytesproblemet är ett avancerat optimeringsproblem, där fortfarande mycket återstår att göra.

3. On-line styrning. Vid Ringhals I och II är planerat för en processdatamaskin med avancerade räkneuppgifter. Så skall t.ex. kontrollstavsrorelser i förväg beräknas med maskinen, den aktuella effekttätheten beräknas ur mätningar och matematisk modell. Hur skall man optimera sin effekttäthet så att en största utbränning i bränslet erhålles? För att lösa detta problem måste man bl.a. finna metoder hur man skall ta reda på aktuella maximeffekten i kärnan.

4. Xenonproblemet i samband med avstängning av reaktor. Hur skall avstängningsstrategier göras så att reaktor med hänsyn till xenonförgiftning kan åter sättas igång efter godtyckligt kort tid?

5. Vid stora reaktorer på 1000 MW eller mer uppträder mycket avancerade rumsstabilitetsproblem. Geometrin är den primära orsaken till att neutronflödet blir "slafsigt" vid dessa stora reaktorer. Hur skall ett reglersystem utformas som kan bemästra dessa avancerade stabilitetsproblem?

3. STABILITET HOS STORA KRAFTNÄT

3.1 K. Norbeck: Krav från nätet vid bortfall av kraftstationer.

Allmänt

Störningar inträffar dels genom bortfall av ett eller flera aggregat vid en station, dels genom störningar i nätet, såsom jortslutningar och kortslutningar (primära fel) eller bortkoppling av ledningar eller transformatorer t.ex. genom felmanöver eller fel på kontrollorgan.

Problem kan även uppstå då ett fel avhjälpes. Huvudsakligen skall behandlas problem med bortfall av en produktionskälla.

Produktionsbortfall

Två krav på varje aggregat:

- 1) Skall ha en sådan storlek och placering att nätet klarar av ett bortfall av aggregatet ifråga.
- 2) Att aggregatet har en sådan stabiliserande verkan och sådana regleregenskaper att det hjälper till att stabilisera nätet vid ett eventuellt bortfall av något annat aggregat.

Praktiska konsekvenser av bortfall:

Frekvens och spänning sjunker och inpendling av aktiv och reaktiv effekt sker till ett nytt jämviktsläge.

Vi fordrar att denna utpendling skall få lokal karaktär och i alla händelser inte skall förstärkas i andra delar av nätet.

Alltså reglerutrustningen måste klara av dessa störningar. Endast i nödfall får drastiska åtgärder tas i bruk, såsom automatisk belastningsbortkoppling och systemuppklippning.

Faktorer som påverkar risken för bortfall:

- 1) aggregatstorlek
- 2) aggregatkomplexitet

Om man jämför ångkraftverk med vattenkraftverk, så är de förra både större och mera komplicerade och man får räkna med 1-2 bortfall/år. Tillgängligheten har statistiskt sett stor spridning, varför det är svårt att för svenska förhållanden med få aggregat arbeta med statistiska metoder. (jfr USA). Det är med andra ord mycket svårt att bedöma hur stora resurser man skall lägga ned på att förhindra bortfall.

Spännings- och frekvensreglering

Frekvens och spänning starkt beroende.

Reglermöjligheter nästan enbart på produktionen, men vid bortfall av de största aggregaten kan man bli tvungen att reglera genom att lösa ut belastningen.

Både stationer och nät har höga krav på tillåtna frekvensvariationer.

Frekvensreglering

I första ögonblicket efter bortfall fås approximativt frekvensändringshastigheten genom

$$-\frac{df}{dt} = \frac{50}{2 \cdot H} \cdot \frac{B-P}{P} \quad \text{(Hz/sek)}$$

där

H är nätets "rörelseenergi" {MWs/MW}

B belastad effekt {MW}

P producerad effekt {MW}

Här är det enbart den kinetiska energins reglerverkan.

Ex. låglastfall 7000 MW, Ringhals 700 MW faller ur
0.7 Hz/sek (H=4)

approximationen gäller ungefär 1 sek.

Följande ekvation ger en fullständigare bild:

$$-\frac{df}{dt} = \frac{50}{2 \cdot H \cdot P} (B-P+R \cdot t-K \cdot \Delta f) \quad \text{(Hz/sek)}$$

där

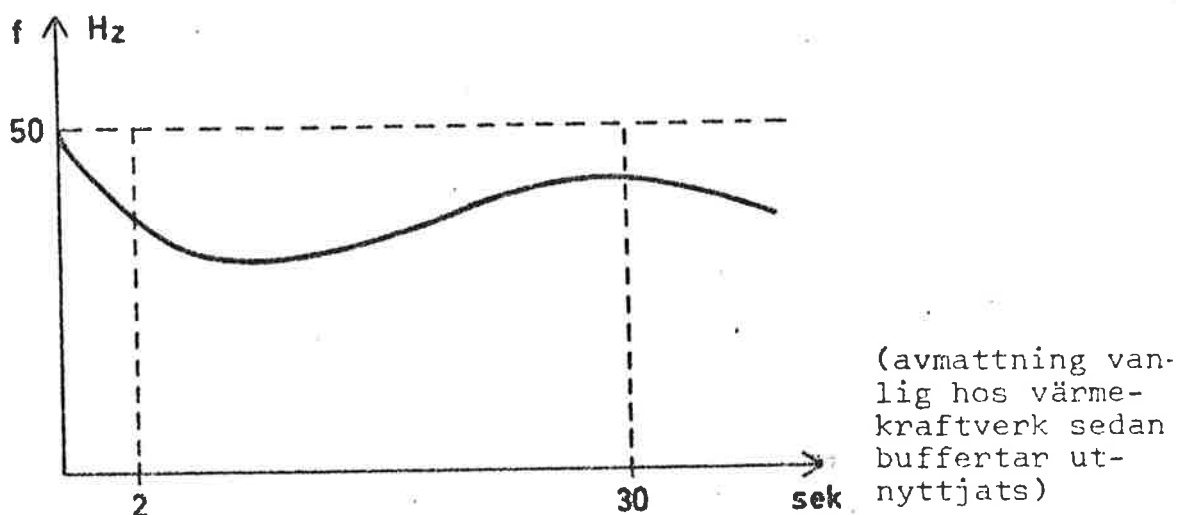
R {MW/s} = kraftverkens sammanlagda reglerhastighet

K {MW/Hz} = summan av belastningens och kraftverkens momentana, frekvensberoende reglerstyrka.

Denna funktion kan ritas upp för varierande parametervärden. Svårigheten är framför allt R, som i sig innehåller tidsfördröjning och andra tidsvariationer.

Automatisk belastningsinkoppling måste också tas hänsyn till i ekvationen.

Kuriosa anm. R blir teoretiskt bättre för ångkraftverk!



Hur stor frekvensstörning man kan tåla är föremål för olika bedömningar i olika länder, men runt 5Hz ligger absoluta max. (Framför allt mekaniska resonanser turbineras, skovel-system begränsar).

När alla regleringsmöjligheter använts finns endast belastningsbortkopplings kvar. Beräkningar pågår för att undersöka vilka gränser i f och $\frac{df}{dt}$ man skall koppla ur och hur stora bitar som skall kopplas ur för att så liten total last som möjligt skall behöva utgå.

Annan möjlighet är att införa "spänningsreserv". Anm. Vattenkraften bra, har högsta verkningsgrad på 75% av maxlast.

Anm. Problem: en frekvensändring ger minskad producerad effekt från de arbetande stationerna. USA har löst genom mycket snabba belastningsbortkopplingar.

Spänningsreglering:

Viktigt att spänningsregulatorerna hos infasat maskineri fungerar snabbt och lämpligt dämpat.

Belastningen alltså starkt spänningsberoende, lägre spänning ger lägre last, dvs tar i alla fall för om all effekt i södra Sverige faller ur så blir det inte riktigt så mycket som måste ersättas från Norrland och belasta stamlinjenätet.

Nätmodeller

Digitalsimulering huvudsakligen numera.

Optimering av aggregatstorlek

- 1) kostn./kWh minskas med storleken
- 2) personalkostn för drift relativt konstant
- 3) nätförstärkningar ökar
- 4) spinning reserve ökar

Diskussion

Hur långt ned kan man gå i frekvens? 45-48Hz som lägst?

Danmark har kört på 44Hz korta stunder (får 1/3 från Sverige, kan falla bort 1-2 ggr/år).

Beror på vilka aggregat man har.

Vid frekvenssänkning får man i vattenkraftverk mindre spelrum för belastningen.

Total effekt i Sverige max 10-12000 MW.

3.2 Å. Ölvegård: Stabilitetsproblem på elkraftnät

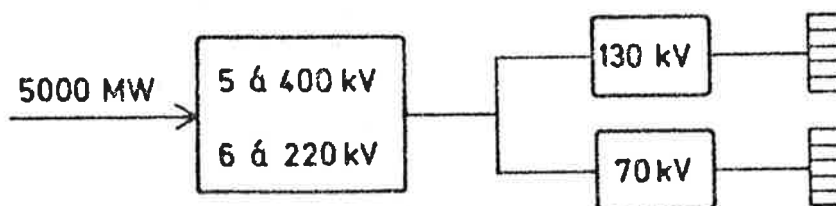
1. Introduktion

Samkörning - rationellt utnyttjande av produktionsresurserna - ställer höga krav på överföringsnätet och dess planering. Stabilitetsförhållanden kan i många fall vara dimensionerande.

Här kommer att behandlas stabilitetsproblem som kan uppkomma i samband med svenska kraftsystemet och samkörningen med Danmark, Finland och Norge.

2. Uppbyggnad av nätet

Vattenkraft i Norrland huvudsakligen, ångkraft och industriella mottrycksanläggningar dessutom. Stamlinjenätet skall föra effekt från Norrland till Syd- och Mellansverige:



Totalt i Sverige ca 10000 MW.

3. Nätets stabilitetsegenskaper

Lugndriftstab: (stationär) dels normal drift

dels ev några maskiner ur drift

dels små ändringar i belastning
och produktion

Dynamisk stab: (gungnings-)

pendlingarna vid korta bortfall får inte bli för stora.
får ej falla ur fas.

4. Dynamiska stabiliteten

Kortslutningar, jordslutningar kräver den felaktiga nät delen
bortkopplas inom några tiondels sekunder, återinkopplas med
felet avhjälpd inom någon sekund.

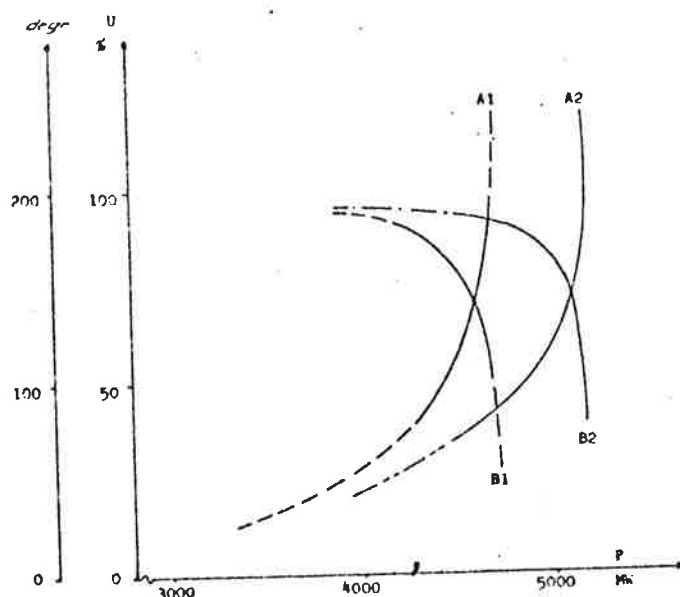


Figure 1 - Transient stability of the Swedish system in stage 1968/69.

A1 : Maximum angle deviation, el. degrees, between machines in the southern and the northern country. Summer peak load.

A2 : Do. Winter peak load.

B1 : Minimum voltage, U, in south Sweden during swings. Summer peak load.

B2 : Do. Winter peak load.

Fig. 1 tvåfasigt jordfel på 400 kV, snabb återkoppling med
ca 0.4s spridningslöst intervall.

→ utpendling mellan Norrland och Själland och spännings-
länken som funktion av aktuell last. sommar (A1), vinter (A2)

→ kraftnätet klarar 5000 MW bra men en tydlig gräns vid
ca 5200 MW.

faktorer:

plusföljds- och nollföljdsreaktanser,

maskinernas övergångsreaktanser och svängmassor

samt felbortkoppling och återkopplingstider.

(kan ej koppla på igen för snabbt av risk för återtändning)

kan påverkas genom försöka minska reaktansen i ledningar

samt genom seriekondensatorer (bäst)

maskinernas spänningsreglering

bra med snabbt i Norrland, dåligt i södra och mellersta Sverig

däremot turbinreglering har liten inverkan på dygnstab.

försök avgränsa felen

5. Lugndriftsstabilitet.

Hittills har man dimensionerat med tanke på den dynamiska stabilitet och som biprodukt fått även lugndriftsstabilitet.

Ökning av aggregatstorleken och mätutbyggnaden (+ seriekompensering m.m.) gör att definitiv utlösning kan ge trasel och lugndriftsstabilitet bli dimensionerande.

Framför allt värmekraftaggregaten

stora, bortfall 1 à 2 ggr/år

Generatorfrånslag:

- 1) 0-30 sek lägre första pendlingsampl. än ledningsfel
spänningsregl på synkronmaskin

turbinregl → norr får ta effekten + extra

överföringseffekt

(ca 35%)

- 2) 30 sek - 5 min

transformator reglering → laståterhämtning

nytt stationärt belastningsfall: finns till-

räckliga reaktiva resurser för spänningsregl.

för att klara de normala belastningsvariationerna

- 3) 5 min

infogade maskiner i syd och mellan Sverige

(+ Danmark) drar på och kan köra produktions-

bortfallet.

medel: nätförstärkningar

åtminstone fram till 1980

då produktionsökning i

södra Sverige förväntas.

spänningsreserv

6. Analysmetodik

Dela upp i a) bestäm dynamiska förloppet

b) bestäm lugndriftsstabiliteten hos slutbalansen
(under förutsättningen att hela belastningen
skall klaras av)

Anm. Även vid låglast på nätet kan stabilitetsproblem uppkomma framför allt för synkronmaskinerna. Den kapacitiva genereringen i lastningsnätet måste konsumeras. Turbomaskiner har liten kapacitiv konsumtion. Använder reaktorer som inkopplas på 400 kV - nätet.

7. Aktuella samkörningsproblem för de nordiska länderna

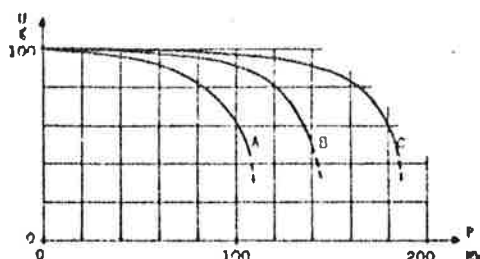


Figure 2 - Minimum voltage, U , in the Swedish network nearby the 200 kV tie line to Finland during swings after a generator outage of P MW in the Finnish system.

A : Power transfer to Finland before fault, 100 MW
B : " " " " " " 0 MW
C : " " " Sweden " " 100 MW

Finland

fig. 2, 1st 200 kV behöver

klarar 125 MW:s bortfall i Finland

men ej 140 MW

Förbindelsen bryts vid 75%:s spänning

I svenska nätet kan frånslaget vara 4-5 ggr större. Stabilitet beror på effektöverföringens storlek och riktning före frånslaget.

Planerar ny 400 kV. Klar 1970.

Danmark, ånga, går snabbast med svenska nätet.

2 x 130 kV - Själland utnyttjas till sin termiska överföringsförmåga
likström Jylland

Norge. Uppdelat i isolerade kraftblock, vilka som framgår av nätkartan är anslutna till svenska nätet.

Stark förbindelse med Östlandet, men sedan detta system förbundits med vissa Vestlandsblock har stabiliteten väsentligt försämrats.

Rana-förbindelsen ger resonanser i t.ex. Själlands-förbindelsen. Vid ansträngd situation på nord-sydgående linjerna kan urkoppling av en 30 MW:s råjärnsugn i Rana-nätet sätta hela nordiska nätet på 17000 MW i gungning med effektpendlingar i Själlandsförbindelsen på 30 à 40 MW och i Sydnorge-förbindelsen på 50 à 100 MW

8. Beräkningsmetoder

digitala modeller på IBM 7090 och CDC 3300

i) dygnstab

steg för steg metoden, se rapporten till PSSC 1966 kan användas för lugndrift genom att störa driftbalansen.

ii) statistiskt stabilitetsprogram - Langer

9. Sammanfattning

Framtiden: värsta felen: bortfall av stora värmekraftaggregat
samlingsckenfel

nätförstärkning erfordras, betydande förbättringar fås genom roterande reaktiv effektreserv i 400 kV framför allt i mottagaränden, håll maximalspänning förbättra stab med optimal sp.reglering, håll väl anpassad rullande aktiv reserv.

+ husmödrar

Ref: A. Ölvegård-P. Langer: Cigre rapport 1968 nr 32.04

3.3 P. Langer: En metod att beräkna stabilitet i stora kraftnät

En generator som producerande element har ur reglerteknisk synpunkt många konstiga egenskaper. Ankarreaktionen minskar fältet på magnetsidan. Generatoren påverkas av nätet på grund av strömuttaget. Varje ändring i fältet ger dynamik åt systemet. Grundläggande undersökningar av kvasistationära förlopp har gjorts av Park, USA.

Generatorekvationerna innehåller dels en rotatorisk term och dels en transformatorisk. Den senare är liten i lugndrift. Ekvationer sättes nu upp enligt principschemat fig. 1 och 2, vilket resulterar i en karakteristisk ekvation av typen

$$a_0 + a_1s + a_2s^2 + \dots = 0$$

vilken är av ordningen ca 12. Routhkriteriet ger nu gränslinjen i fig 3 för stabiliteten.

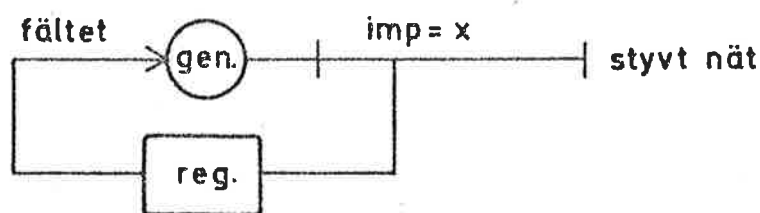


Fig. 1

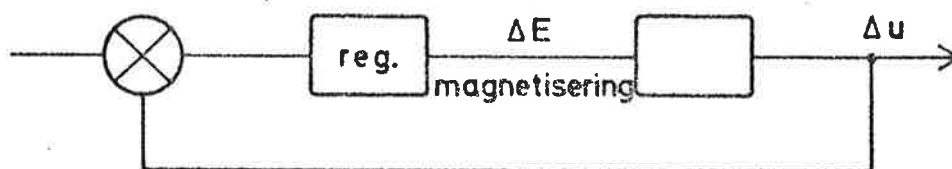


Fig. 2

Karakteristisk ekv: $a_0 + a_1s + \dots = 0$

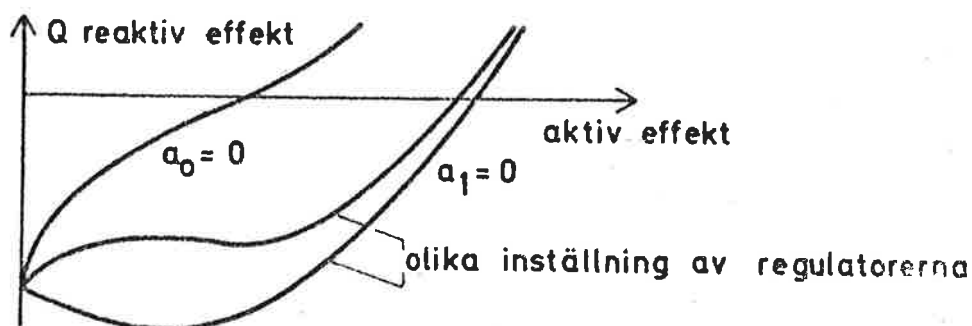


Fig. 3

Statisk stabilitet i stora system

Nätets diff.ekv. laplacetransformeras, varefter argumentvariationsprincipen användes. Generatorerna knytes ihop med aktiv och reaktiv effekt enligt ekvationerna, som gäller för små avvikelser från jämviktswärdena.

$$\Delta P = H(s)\Delta\phi + K(s)\Delta e$$

$$\Delta Q = L(s)\Delta\phi + M(s)\Delta e$$

För varje knutpunkt erhålles 2 variabler. Med ca 100 knutpunkter för ett stort kraftnät innehåller stabilitetsproblemet ca 200 variabler.

Det har visat sig att vanliga egenvärdesberäkningar för stabiliteten ej går att använda i system högre än ordningen ca 40. För högre ordningstal har argumentvariationsprincipen visat sig mycket bra. Tiden på CD 3300 är ca 2 minuter för en frekvens och 100 knutpunkter. Normalt vill man undersöka 8 frekvenser.

Det har visat sig att noggrannheten i beräkningarna påverkas kraftigt beroende på hur generatorerna numreras i ekvations-systemet. Genom att inordna dem i ungefärlig geografisk ordning kom man att få en väsentlig förbättring av noggrannheten, vilket torde kunna förklaras att elementen i systemmatrisen blev orienterade kring diagonalen, vilket alltid är bra ur noggrannhetssynpunkt.

Ref: 1. Se Ölvegård

2. A. Johansson: En metod att beräkna statisk stabilitet samt några tillämpningar. KTH, El anläggningsteknik 1967.

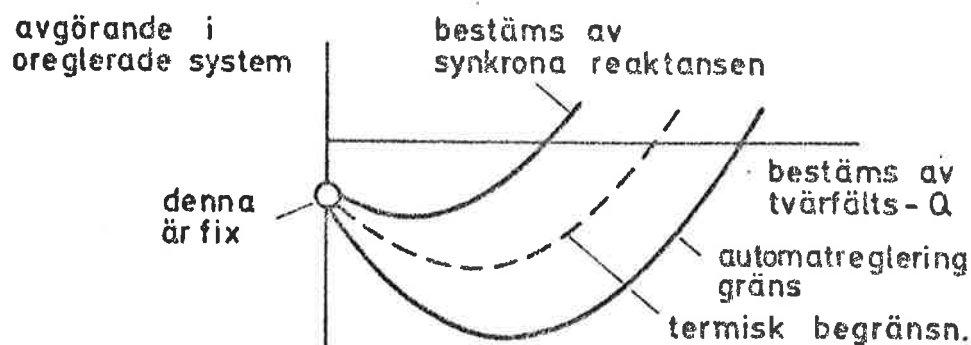
Diskussion

Tedestål: Är generatorernas reaktanser väsentliga för stabiliteten?

Är den klassiska synkronreaktansen (kortslutningsförhållandet) väsentlig?

Langer: Höga transienta reaktanser (40%) måste accepteras och skall säkert gå bra enligt Ölvegårds undersökningar. Ringhals uppdelning i två aggregat spelar ingen roll för detta förhållande.

Synkrona reaktansen:



Tedestål: I verkligheten finns termiska begränsningar.

Langer: Om vi minskar synkrona Q (ökar kortslutningsförhållandet) ~~till 0.4 till 0.5~~ kostar detta ganska litet (någon %).

Almström: Svårt att uppfylla kravet på svängmassa i systemet.

Langer: Hänger mycket på turbinen. Generatorns svängmassa betyder ca 10% av hela svängmassan.

4. PRODUKTIONSPLANERING, DRIFT- OCH SAMKÖRNINGSFRÅGOR

4.1 H. Pettersson: Optimerings- och övervakningsmetoder för elektriska kraftsystem

I Sverige använder man ännu inte datamaskiner till on-line styrning av kraftnätet. I USA har man däremot gjort det i 10 år.

USA

Det amerikanska systemet är baserat på tre olika huvudprogram.

Unit Commitment
Economic Load Dispatch
Load Frequency Control

Intervall mellan
varje körning
24 tim

5 min

5 sek

Fig. 1

Unit Commitment

Detta program väljer ut de kraftaggregat som skall användas samt beräknar deras start- och stopptider. Programmet har konstruerats på två sätt:

- 1) Preferenslista: Man sätter upp startordningen för de olika aggregaten i en preferenslista.
- 2) Dynamisk programmering. Man gör en fullständig optimering av start- och driftskostnader. Denna metod är mindre vanlig.

Economic Load Dispatch

Man beräknar marginalkostnaderna som funktion av den angivna effekten. Start- och tomgångskostnader medtages inte. Sedan anpassar man produktionen till lasten på ett optimalt sätt.

Load Frequency Control

Man beräknar storleken på den erforderliga produktionsändringen ur

$$ACE = (D_i - A_i) + B \cdot \Delta f$$

där

ACE = average control error (erforderlig produktionsändring i MW)

D_i = dispatched interchanges (avsett utbyte)

A_i = actual interchanges (verkligt utbyte)

B = den reglerstyrka med vilken kraftproducenten skall bidra till nätet.

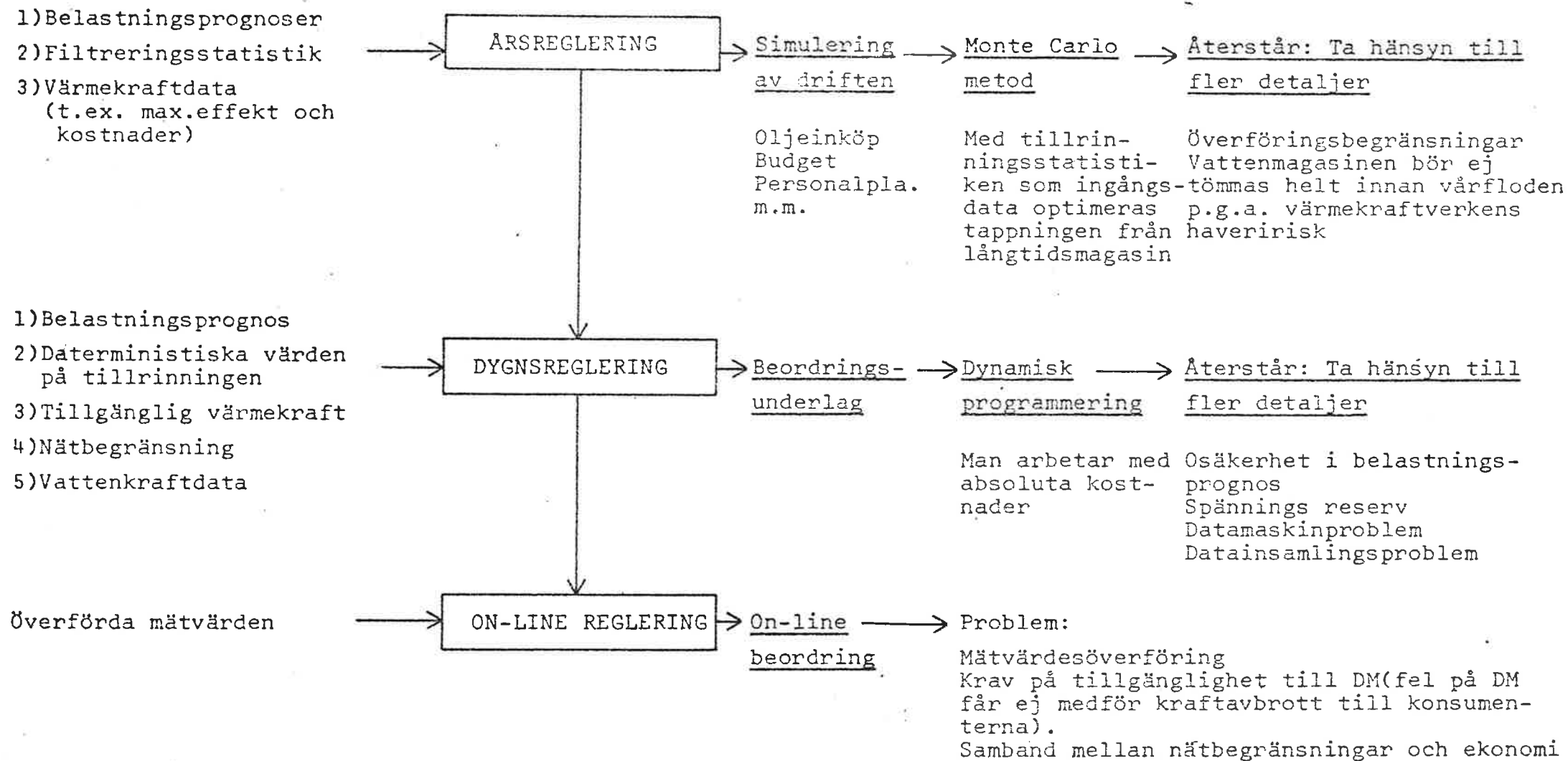
Δf = frekvensändringen

Sverige

I Sverige kan man inte använda det amerikanska systemet eftersom det hänförs till värmekraftreglerade områden. Vattenkraften dominerar i Sverige och detta medför att man t.ex. måste optimera för ett helt dygn åt gången beroende på att mängden vatten är bestämd för varje dygn. Detta medför svårigheter.

Sydkrafts regleringsprogram

Se Fig. 2.



4.2 L. Thyren: Produktionsplanering inom kraftindustrin

Vattenkraftens rörliga kostnader kan försumma jämfört med värmekraftens. Därför vill man i första hand utnyttja vattenkraften.

Tillrinningen av vatten varierar under året.

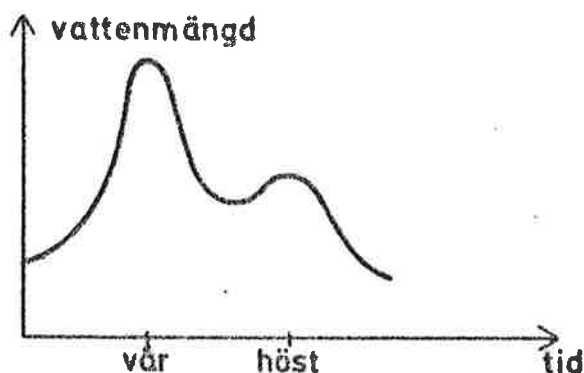


Fig. 1

Med hjälp av långtidsmagasin kan inverkan av denna variation elimineras. Vattenmängden varierar emellertid också mellan olika år och hänsyn måste tas härtill vid produktionsplaneringen.

Årsreglering

Beräkningarna utföres med hjälp av dynamisk programmering. Man använder sig av en tillrinningsstatistik upptagen under 30 år.

De olika älvarna, vattenmagasinen och kraftstationerna slås samman till ett system i den modell man arbetar med, fig. 2.

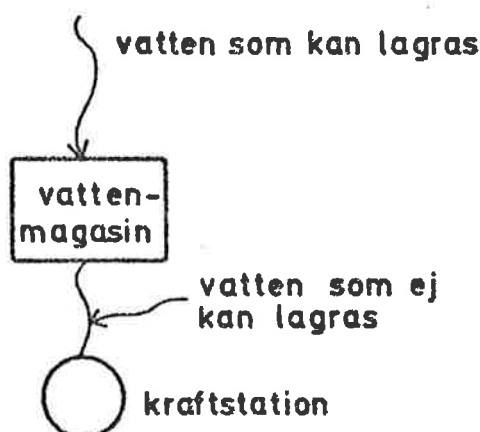


Fig. 2

Året indelas i 13 fyraveckorsperioder. För varje period beräknas en kostnadskurva för värmekraften, fig. 3.

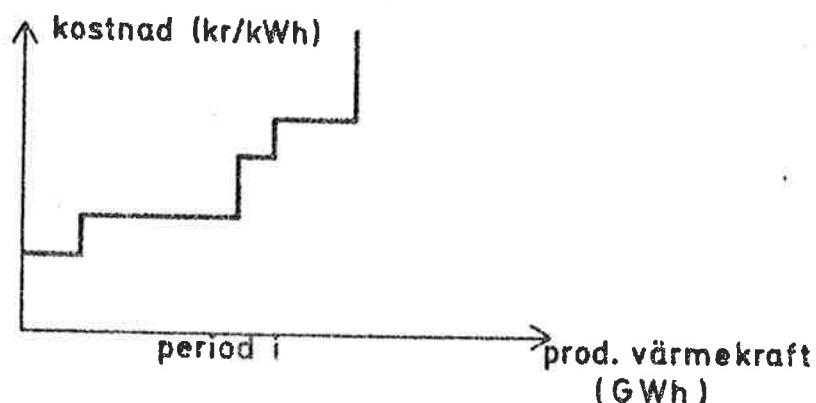


Fig. 3

För varje period beräknas också en kurva som anger kostnaden för vattenkraften vid olika mängder vatten i magasinet, fig. 4.

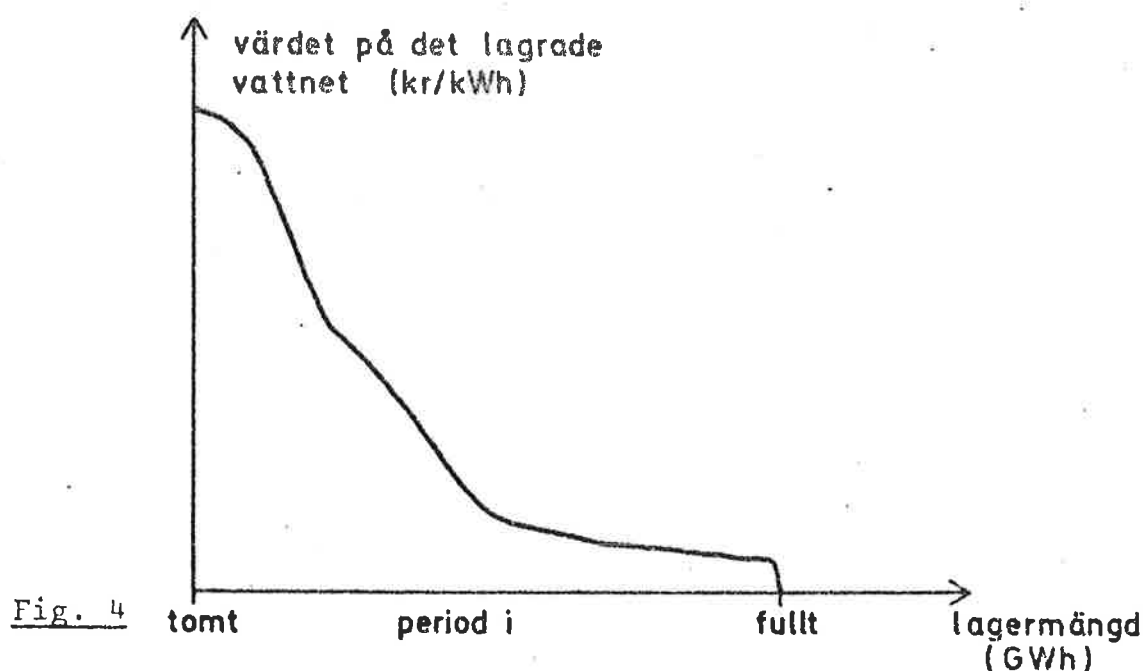


Fig. 4

Om man känner lagermängden vid ett visst tillfälle kan man alltså beräkna kostnaden per kWh för vattenkraften. Detta jämföres sedan med kostnader för värmekraften (fig. 3). Man kan då minimera kostnaden för den totala produktionen. Kurvan i fig. 4 beräknas med iterativ metodik.

Modellen i fig. 2 har också utvidgats till att omfatta två förbundna system. Om antalet förbundna system göres större än två blir emellertid dataprogrammet alltför tidskrävande.

Veckoreglering

Den metod som används här kan karakteriseras som en gradient-metod kombinerad med linjär programmering. Veckan indelas i 14 intervall. Dataprogrammet kan omfatta högst 40 kraftstationer i 10 olika älvar. Mellan varje station finns ett magasin. Varje älv får ha två grenar, fig. 5.

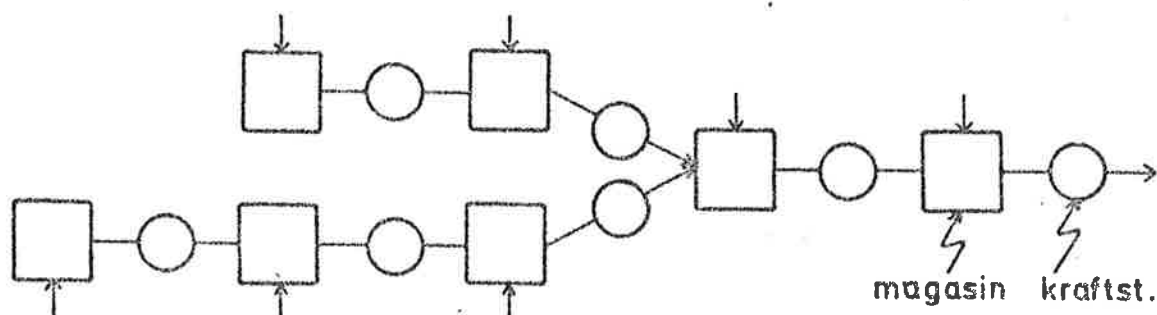


Fig. 5

Ingen hänsyn tas till vattnets gångtid.

Magasinen har begränsad kapacitet. Detta kan beskrivas med linjära bivillkor. Överföringsförlusterna är däremot kvadratiska, och man blir då tvungen att linjärisera. För att förenkla problemet ytterligare utför man optimeringen bara för en älv i taget och låter de övriga ha en konstant produktion.

Dygnsreglering

Programmet är i detta fallet vidareutveckling av veckoregleringsprogrammet. Man har bl.a. tagit hänsyn till vattnets gångtid mellan de olika stationerna. Dygnet indelas i 12 två timmarsintervall. Programmet bestämmer start- och stopptider för de aggregat som skall köras. Man har inlagt begränsningar så att ett aggregat inte får startas hur många gånger som helst per dygn.

Körtiden för de olika programmen är mindre än en halvtimme.

Vattenfall har funderingar på att bygga en modell för hela vattenkraftssystemet för att utföra simuleringar.

Ref: J. Lindkvist - L. Thyren: Optimized Electric Power
Production Planning by Digital Computers in Sweden.
Sw. State Power Board.