

## 3.2. Driftstekniske problemer i det integrerende nordiske kraftsystem

*Afdelingsingenør JENS EHLERT KNUDSEN, NESA-IFV*

### Inledning

Med en installeret effekt på mere end 40 000 MW og et årsforbrug omkring 170 TWh ligger det nordiske system et sted imellem Frankrigs og Englands tilsvarende tal og halvanden gange de for Italien gældende værdier. Det udgør et system svarende til ca. 10 % af USA's og er i mange henseender sammenligneligt med det i den nordøstlige del af USA og Canada som NPCC betegnede system (Northeast Power Coordinating Council).

Geografisk dækkes et område lidt større end de nævnte europæiske lande og svarende til NPCC's område — men væsentligt tyndere befolket og med afstande op til 2 000 km.

De store forskelle i klima og nedbørsforhold og i erhvervslivets struktur afspejler sig i opbygningen af de enkelte landes produktionssystemer. I Norge udelukkende vandkraft med en stor andel kraftslugende industri og en elproduktion, som udgør en 5 gange større andel af nationalproduktet end i det rene dampkraftland Danmark. Sverige fortsat domineret af vandkraft, men hastigt på vej mod varmekraft — og her især kernekraft, i stor udstrækning leveret af svensk industri. Finland ligeledes på vej mod varmekraft, der allerede nu dominerer, og hvor industriens egen modtryksproduktion udgør et kraftigt islæt.

Disse forskelligheder giver ikke alene baggrunden for samarbejdet til gengividig fordel — men de skaber også en række tekniske problemer, som nok vil vokse i omfang fremover.

I modsætning til de nationaliserede elforsyninger i England, Frankrig og Italien findes i det nordiske system et stort antal private og statslige foretagender, som på frivillig basis må løse disse tekniske problemer ved samarbejde på analog måde, som det gøres i nordøst USA—Canada — og med personel-ressourcer, der er tilsvarende små — jævnført med de nationaliserede landes — som befolkningstallet er mindre.

Samarbejdet foregår i stigende omfang gennem Nordels driftskomit  og koordineret med planl gningskomiteen. Der er etableret en række arbejdsgrupper, hvori flere og flere af de forskellige foretagenders medarbejdere inddrages, og hvor sprogvanskelighederne lykkeligvis er overkommelige —

i alt fald når danskere og finner forsøger at tale svensk. I det følgende skal der gives en række eksempler på de opgaver, som er taget op — og flere vil blive belyst i de følgende foredrag.

## Netdata og lignende

Et umiddelbart teknisk problem er koordineringen af relæindstillingerne i samkøringsledninger og definitionen af disse overføringsevne. Jeg husker en pinselørdag for mange år siden, hvor der opstod en omfattende afbrydelse på Sjælland under stor leverance fra Sverige — fordi der ikke var tilstrækkelig koordinering mellem nogle reservebeskyttelsesudstyr. Denne koordinering er forlængst lagt i faste rammer, og en beskrivelse af relæudstyr og disse indstillingsværdier er udformet i driftdatagruppen og udvekslet mellem de implicerede landes drifts- og relæafdelinger.

Hvorvidt man skal gå videre og eventuelt udveksle tilsvarende information om interne ledninger, der eventuelt kan blive flaskehalse under forstyrrelser, står tilbage at undersøge.

Koordinering af bærefrekvensudstyr og de frekvenser, der kan benyttes, er en lige så åbenbar nødvendighed. Dette gælder i øvrigt andre telekommunikationsproblemer i forbindelse med eksisterende og kommende sammenkobling af landenes drifttelenet. Specialisterne på dette område mødes med visse mellemrum og udveksler synspunkter og erfaringer, som rapporteres videre til driftskomiteen.

Ved beregninger af kortslutningseffekter og jordslutningsstrømme er det af betydning at kende noget til nabonettenes opbygning og data. Det samme gør sig gældende ved beregninger af fordelingen af strømme, spændinger, effekt og reaktiv effekt, navnlig hvor det findes flere parallelle samarbejdsledninger.

En oversigt over driftsspændinger i samkøringspunkterne er udarbejdet af driftdatagruppen. Herudover udveksles med jævne mellemrum netdata og beregningsresultater for nabonet. Dette sker hovedsagelig bilateralt. En mere fuldstændig samling af netdata (ledninger, transformere, forventede belastninger) er udarbejdet — men foreløbig kun samlet hos Vattenfalls stabsafdeling, hvor de fleste beregninger vedrørende det samlede Nordel-net er udført.

Der er et udpræget behov for ækvivalente net til brug ved disse beregninger, og også når man ved beregninger af egne forhold ønsker at tage hensyn til nabonettenes med større eller mindre grad af præcision. Der findes metoder og programmer til fremstilling af netækvivalenter på computere for så vidt angår statiske forhold, men når dynamiske forhold ønskes betragtet, er der desværre ikke nogen éntydig metode til fremstilling af ækvivalenter

med større eller mindre grad af reduktion af virkeligheden. På dette punkt kunne ønskes bidrag til udviklingen fra f. eks. de tekniske højskoler. Nu må der foretages detaljerede beregninger i hvert enkelt tilfælde — og baseret på empiriske metoder — når nye ækvivalenter skal fremstilles. De må i de enkelte tilfælde testes imod mere omfattende net.

Et andet område af driftsteknisk interesse i forbindelse med forudberegning af dynamiske forhold er karakteren af den belastning, som optræder i nettet. Selv om der er gjort visse forsøg på at bestemme belastningens afhængighed af navnlig spændingen, er kendskabet hertil ret pauvert — hvilket er beklageligt, da stabilitetsundersøgelser har vist, at netop spændingsafhængigheden har ret stor betydning for beregningsresultaterne. Også på dette område kan efterlyses en indsats fra de tekniske højskoler.

En systematisk samling af data for synkronmaskinerne i nettet er ret langt fremme — omfattende magnetiseringskurver, diverse reaktanser, tidskonstanter og inertifaktorer. For nyere maskiner kan oplysningerne som regel fås fra fabrikanterne — selv om det i mange tilfælde ikke sker umiddelbart ved første henvendelse! For ældre anlæg er det ofte umuligt at fremskaffe detaljerede oplysninger, og en gennemførelse af målinger til bestemmelse af disse er håbløs. Man må da nøjes med at benytte sådanne værdier, som kan anses for karakteristiske for vedkommende type. Problemerne i forbindelse med reguleringssudrustningen skal jeg vende tilbage til senere.

I det oprindelige oplæg til driftdatagruppens arbejdsområde forudsås et register for alle netdata af interesse for brugerne, dvs. de for driftovervågning ansvarlige — og med hensyn til fremtidige undersøgelser de for netplanlægningen ansvarlige. Databanker af denne karakter er oprettet i Danmark hos såvel ELSAM som KRAFTIMPORT, hvor alle data er indlagt i computere for dels den nuværende situation og dels for fremtidige stadier (til primo 1980'erne). I Finland findes et lignende system. Det kan nok konstateres, at sådanne databanker er forholdsvis enkle at oprette og vedligeholde i mindre områder, navnlig når såvel driftsproblemer som planlægningsproblemer behandles af de samme specialister.

Det er mit indtryk, at problemerne er af en anden størrelsесorden i Norge og Sverige — ikke alene fordi datamængden er væsentlig større, men måske også fordi der er større adskillelse mellem driftovervågning og planlægning.

Vi har iøvrigt også hos Kraftimport fundet det praktisk at adskille den aktuelle situation, som der løbende foretages beregninger på via en terminal med dataskærm forbundet til en stor computer, og fremtidige situationer, hvis data opbevares på et andet magnettape i en anden computer.

At forestille sig én stor databank for hele Nordel-området er nok i en meget lang tid fremover utopisk. Derimod bør det være en målsætning inden for en overskuelig tid at kunne rekvirere data hos hinanden for en given

situation og få disse med så kort varsel som svarende til postvæsenets ekspeditionstid. Senere kan et datatransmissionsnet måske nedsætte tiden til nogle få timer.

## Registrering og rapportering i forbindelse med driftsforstyrrelser

For at drage mest mulig lære af driftsforstyrrelser er det jo nødvendigt at foretage registreringer af de vigtigste hændelser i nettet under forstyrrelsen. I alle systemer findes skrivere af forskellig art og relæmarkeringer, som skal registrere hændelserne. Et driftsteknisk problem er naturligvis at opsætte disse på rette steder, i fornødent omfang og af den rette type. Det er pålagt driftsdatagruppen at fremkomme med forslag til opsætning i Nordel-systemet af velegnet registreringsudrustning. Der undersøges her forskellige fabrikater og disses egenskaber og anskaffelsesomkostninger, ligesom det også overvejes, hvorledes de allerede forefindende eller planlagte computere eventuelt kan udnyttes til dette formål.

En fast praksis med henblik på hurtig bearbejdning af det i dag fremkommende materiale i form af relæmarkeringer, registrerede kurver, hurtig-skriver-registreringer o. l. er udformet. For driftsforstyrrelser, som har berørt nettene i flere lande, samles alt relevant materiale omgående, og kopier sendes til Vattenfall's Drift & forvaltning, Selektivplankontoret. Der foretages derefter en hurtig præliminær analyse af driftsforstyrrelsen, som omgående tilsendes de berørte foretagender. For de mere interessante fejls vedkommende foretages en væsentlig mere detaljeret analyse — eventuelt med en computersimulering af fejls forløbet. Sådanne analyser er meget tidskrævende, men tjener ikke alene til en større forståelse af hændelsesforløbet — og dermed til skabelse af bedre grundlag for eventuelle beslutninger om ændringer — men også til en kontrol af det beregningsværktøj, som benyttes til forudsigelse af fremtidige driftsituationer med optrædende fejl.

I forbindelse med omtalen af driftsforstyrrelser er det naturligt at omtale, at der gennem en årrække er indsamlet statistik over optrædende fejl i ledningsnet, transformere, afbrydere og sammeskinner efter ensartede retningslinier i Nordel. Desuden føres statistik over havarier på kraftværkerne — ligeledes efter retningslinier, som er ensartede i Nordel-området. Selv om de fra statistikkerne uddragne værdier hovedsagelig tjener som baggrund for planlægningen af systemet, er det ikke utænkeligt, at de kan få betydning også i driftsmæssig henseende, når der engang bliver udviklet bedre matematiske modeller til vurdering af leveringssikkerheden i en aktuel eller umiddelbart forestående situation.

## Reg. pendl./måned

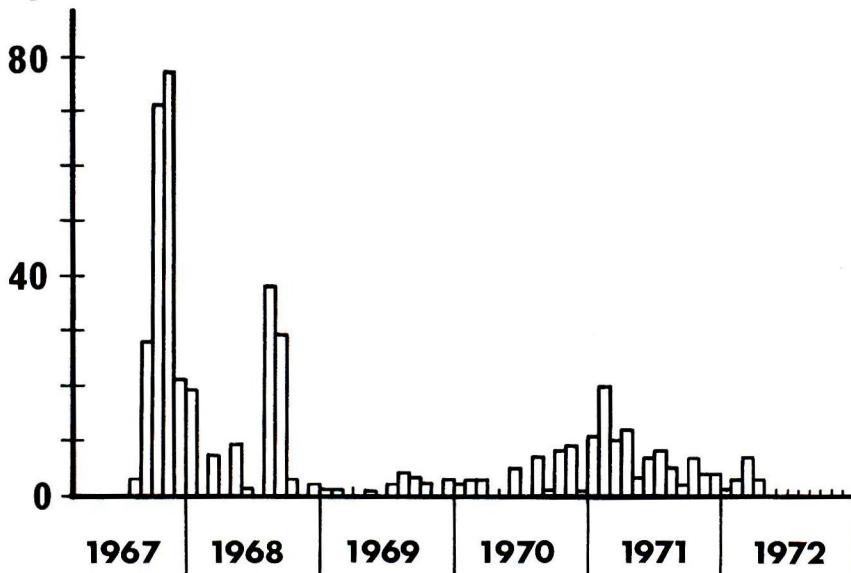


Fig. 52. Pendlinger i det nordiske system.

### Stabilitetsproblemer og foranstaltninger mod pendlinger

De pendlinger, som i de senere år jævnligt er opstået i det skandinaviske net — jvf. fig. 52 — har ikke deres rod i et helt nyt og ukendt forhold inden for elforsyningen. Tilsvarende forhold har været kendt i Canada og USA tidligere, og mulighederne for pendlingernes opståen var forudset i Stabsafdelingen på Vattenfall, hvor der gennem en årrække har været foretaget stabilitetsundersøgelser af hele det nordiske net.

Der kan desværre ikke peges på én bestemt faktor som kilde til besværlighederne — undtagen måske i ELSAM's net, hvor der i den allerseneste tid har været tilløb til langvarige indbyrdes pendlinger internt i det jydsk-fynske net. Disse kan med ret stor sikkerhed tilskrives en uhensigtsmæssig indstilling af spændingsregulatorerne, og midlet til at undgå pendlingerne er kendt.

I det europæiske net og i England er problemet ikke aktuelt, hvilket kan tilskrives den indledningsvis nævnte store koncentration af belastning og produktion med deraf følgende kraftige udbygning af ledningsnettene. En lignende kraftig netforstærkning i Nordel vil naturligvis kunne løse problemerne — men her må jo ske en afvejning over for de økonomiske muligheder for netudbygningen, og ledninger er jo ikke produktive i samme forstand som kraftværker. Umiddelbart konstaterer man jo kun, at de giver anledning til tab, når de udnyttes!

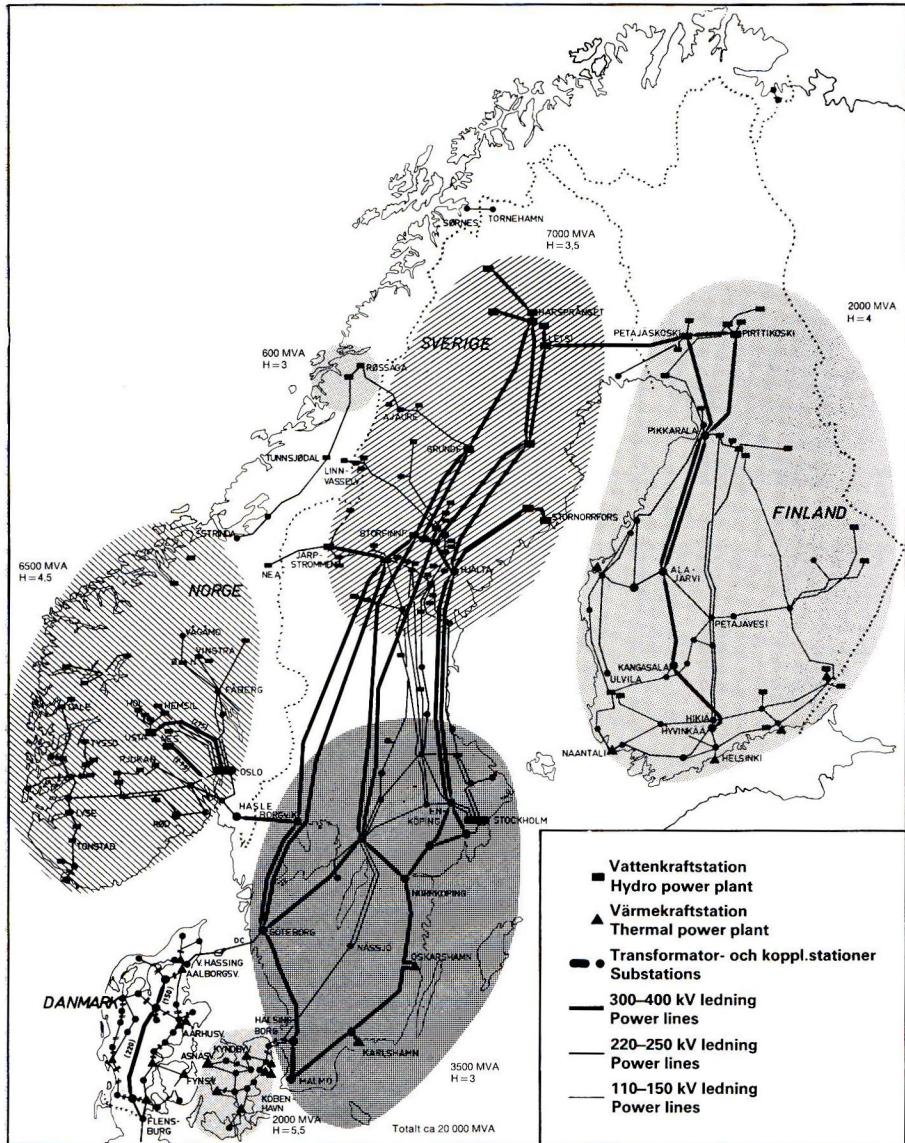


Fig. 53. Samkørende områder i det nordiske net.

En simpel analogi til anskueliggørelse af de effektsvingninger, som ligger bag pendlingerne, kan fås ved at ækvivaltere systemet med et mekanisk system af masser indbyrdes forbundet med fjedre. Masserne modsvarer inertien i de roterende maskiner, og fjedrene svarer til ledningernes reaktanser, der groft sagt er proportionale med ledningslængden og omvendt proportionale med spændingens kvadrat. Store generatorer med stor masse, som forbindes gennem svage forbindelser — slappe fjedre — giver lange svingningstider. For

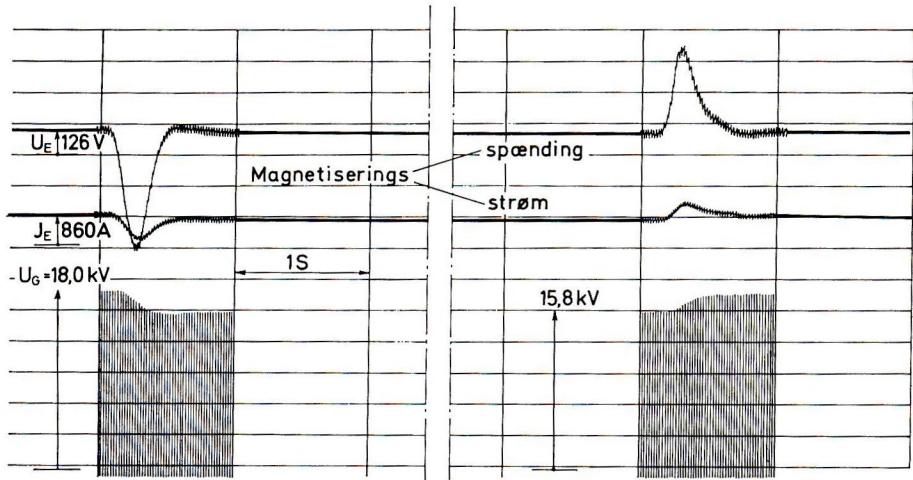


Fig. 54. Pludslige spændingsændringer på ensrettermagnetiseret generator. (Asnæsværket)  
Uddæmpet efter ca 12 perioder.

Sjælland som helhed kan f. eks. beregnes, at den naturlige svingningstid er af størrelsesordenen 2 sek., og det har erfaringen bekræftet tilstrækkelig ofte i de senere år. Jo flere generatorer, der tilsluttes uden samtidig forstærkning af samkøringsforbindelserne, desto længere svingningstid får man. I det sammenhørende nordiske system, som groft er skitseret i fig. 53, er der flere steder svingningstider af størrelsesordenen 4 à 5 sek. Yderligere kan der optræde resonansfænomener, hvis to områder har samme svingningstid, som det er hændt ved flere lejligheder mellem Sjælland og det norske Ranaområde nord for Trondheim.

Lange svingningstider er uheldige af flere årsager. Dels bliver de naturligt forekommende dæmpende virkninger — som først og fremmest de i rotoren og dens dæmpevikling inducerede strømme fremkalder — mindre, og dels får ved langsomme svingninger regulatorerne større muligheder for at gibe ind — og da ofte på en uheldig måde, hvis man ikke har overvejet nøje den korrekte indstilling.

Når de automatiske regulatorer, der styrer spændingen og effekten, kommer ind i billedet, kan den ovenfor omtalte simple analogi ikke længere anvendes. Her må nødvendigvis benyttes moderne reguleringstekniske analysemetoder, som foreløbig kun et begrænset antal specialister behersker fuldt ud.

De hurtigste regulatorer er spændingsregulatorerne, som er udviklet til styring af de moderne magnetiseringssystemer baseret på ensrettere. Kravet om større og større generatorer til lavest mulige priser har medført, at disse i elektrisk henseende er blevet ringere end de tidligere mere tunge enheder med rigelige mængder af kobber i rotor og stator. Desuden har man måttet

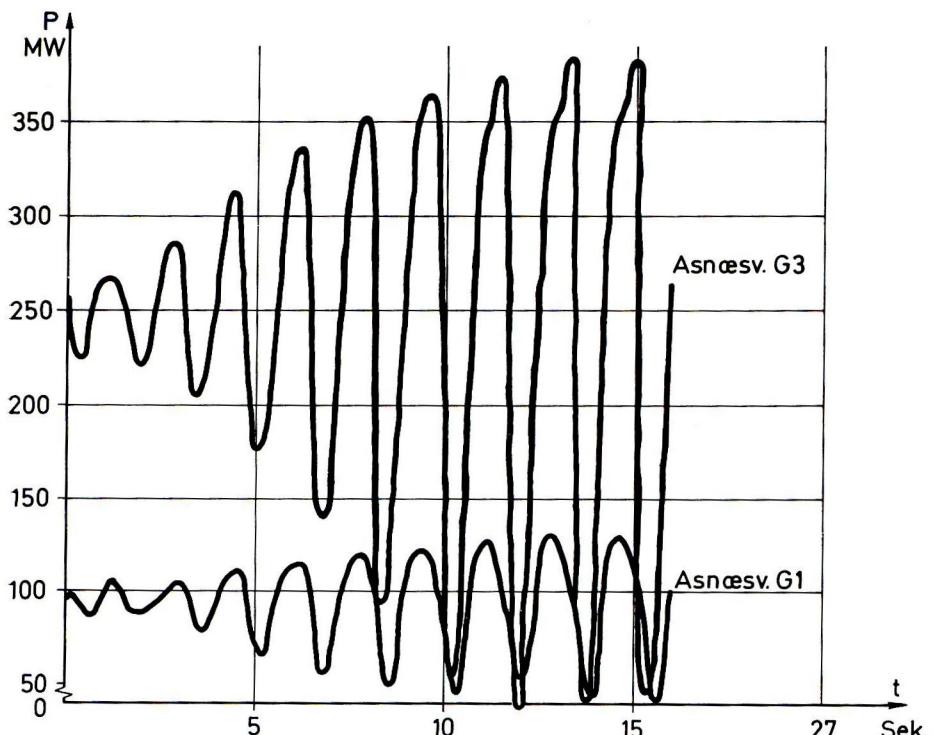


Fig. 55. Dæmpende pendlinger i på Asnæsværket.

erstatte de tidligere benyttede kommutatormagnetiseringmaskiner med ensrettere og hertil udviklet elektroniske regulatorer, således at man i visse henseender kan opveje nogle af de uheldige elektriske egenskaber. F. eks. kan fås en meget hurtig reaktion på forstyrrelser i nettet i form af pludselige ændringer (kortslutninger, udkobling af andre enheder eller af ledninger). Fig. 54 illustrerer, hvorledes en pludselig spændingsændring udregieres efter ca. 12 perioder, og det er naturligvis en fin præstation, som fabrikanten kan være stolt af.

Et andet forhold, som regulatoren skal mestre, er att sørge for en så konstant spænding hos forbrugerne som muligt, dvs. fastholde spændingen på et ønsket punkt, f. eks. på kraftværkets samleskinne gennem lange tidsrum i døgnet og herunder også, når generatoren føder lange, tomgående ledninger eller af hensyn til driften kører undermagnetiseret. Spændingsregulatoren og magnetiseringsudrustningen indeholder en meget stor forstærkning, og når flere forstærkere samarbejder, risikerer ustabile forhold. Det, som er problemet, er at finde en sådan udformning af reguleringskarakteristikkerne, at de får en høj forstærkning over for hurtige forløb og en moderat forstærkning over for de forløb, som er karakteristiske under pendlinger.

Et karakteristisk pendlingsforløb er vist i fig. 55, og det er umiddelbart

forståeligt, at sådanne forløb ønskes undgået. En løsning, der såvel teoretisk som efterprøvet i praksis, har vist sig gunstig, er at tilføre spændingsregulatoren andre signaler end de normalt anvendte: spænding og strøm (gennem en kompounderingsimpedans). Gennem det såkaldte derivattilsatsudstyr tilføres signaler, som repræsenterer polhjulets vinkel. Det er jo netop polhjulets bevægelser i forhold til systemet, som er et udtryk for effektsvingningerne. Når polhjulet retarderer, giver derivattilsatsen et signal, som sænker spændingen, således at der afgives mindre effekt til nettet. Under en acceleration af polhjulet hæves spændingen, hvorved nettet tager større effekt og derved afbremser accelerationen.

Kunsten er at blande signalerne fra dette udstyr i det rette forhold og at sørge for, at de tilføres spændingsregulatoren i den rette takt (fase). Nogen simpel metode til på forhånd at bestemme dette findes endnu ikke. Der er tilmed et eksempel på, at en indstilling, som var gunstig ved idriftsættelsen, viste sig at have den stik modsatte effekt under en speciel driftstilstand (som ganske vist indebar en unormal netsituation). Indstillingen er med andre ord afhængig af regulerudrustningens placering i nettet.

Inden for driftdatagruppen er der iværksat en indsamling af data for eksisterende udrustninger omfattende dels indstillingsværdier og dels dynamiske egenskaber. Dette er et meget omfattende arbejdsmål, som f. eks. på Sjælland har indebåret en række målinger på regulator- og magnetiseringsudrustninger for forskellige typer af udstyr.

Sideløbende med dataindsamlingen foregår der teoretiske overvejelser — delvis i samarbejde med fabrikanterne — for at nå frem til specifikationer af regulerudrustningerne. Det er herunder blevet helt klart, at der inden for Nordel nødvendigvis må eksistere tilstrækkelig sagkundskab til, at det kan angives præcist over for leverandørerne, hvad det leverede udstyr skal kunne i et integreret system som det nordiske. Den tid er forbi, hvor fabrikanten ved afleveringsprøverne viser, at udstyret klarer en fin spændingsregulering i tomgang uden forbindelse med nettet. Det arbejde, som er i gang på forskellige fronter i Norden, søges nu koordineret i en specialistarbejdsgruppe, hvori også andre end elforsyningsfolk deltager.

Grundlaget for installation af derivattilsatsudrustninger er givet i nogle rapporter til Nordel's planlægningskomité, hvor det er konstateret, at mindst 25 % og helst 40—50 % af maskineffekten i det nordiske kraftsystem bør forsynes med stabiliseringsudrustning. Først og fremmest store vandkraftgeneratorer og turbogeneratorer med hurtige magnetiseringssystemer.

I det svenske net foreslås udrustningen opsat på en samlet maskineffekt på ca. 2 000 MVA i Norrland: Seitevare, Letsi, Gallejaur, Ajaure samt Harsprång, Messaure og Stornorrhors. Herudover på nye anlæg: Vietas, Ritsem f. eks. og på alle nye enheder større end 200 MVA.

I Syd- og Mellemverge foreslås eksisterende generatorer i Stenungsund, Øresundsverket og Karlshamn — ialt ca. 1 100 MVA — forsynet med til-satsudrustningen.

På Sjælland er udstyret opsat på Asnæsverkets G3 og G4 samt Stigsnæs-værkets G2. Desuden bliver kommende større aggregater forsynet med til-satsudrustningen.

For Norges vedkommende konstateres, at der her sandsynligvis foreligger det største behov for vinkelderivatilsatsudstyr — men at installationen af disse ud fra et samlet nordisk stabilitetssynspunkt bør ske i kombination med større netforstærkninger.

Der er bestilt anlæg til afprøvning i 1972, men endnu er det ikke helt klarlagt, hvilke maskiner, som skal udstyres med disse. I visse tilfælde kan det blive aktuelt at udskifte ældre regulatorer til nye, hurtigere typer med bibeholdelse af eksisterende magnetiseringssystemer. Fra norsk side er udtrykt interesse i at bevare en høj forstærkning i spændingsregulatorerne af hensyn til den stabilitetsforbedrende virkning under transiente fejlforløb. Det forventes, at denne — for pendlingerne ugunstige — store forstærkning kan modvirkes af derivatudrustningernes dæmpende virkning under pendlinger.

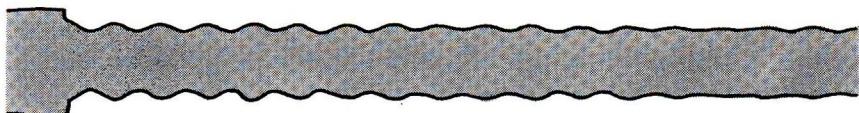
I Finland bør vinkelderivatudstyr opsættes i nogenlunde samme omfang som i Sverige.

De allerede installerede udstyr er afprøvet i stationerne (jf. fig. 56), og indstillingen er til dels bestemt under disse prøver. Denne indstillingsmetode er besværlig — kræver kunstigt fremkaldte langvarige pendlinger — og der er i høj grad behov for enklere metoder.

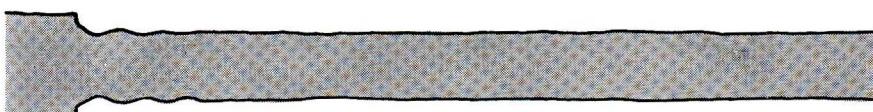
Beregningemetodikken ved analyse af stabilitetsforhold har undergået en rivende udvikling siden sidste Samköringskonference med en stedse mere raffineret repræsentation i computerne af de virkelige forhold i nettet. Beregningerne er dog særdeles omfattende, og behovet for hurtigere og billigere metoder er stort. Dette gælder ikke mindst, hvis man forestiller sig en hurtig check på stabilitetsforholdene, kort før der træffes aftale om en given udnyttelse af nettet, f. eks. i forbindelse med en overførsel af effekt fra ét område til et andet.

## Effekt-frekvensregulering

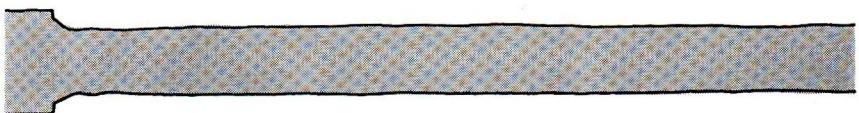
Når bortses fra enkelte fjerntliggende netområder og fra Jylland, som har fælles frekvens og synkrontid med det kontinentaleuropæiske net, har de øvrige nordiske lande fælles frekvens — bortset fra de korte perioder, f. eks. i forbindelse med driftsforstyrrelser, hvor dele af systemet kører adskilt. Frekvensen holdes på normalværdien 50 Hz med en afvigelse under  $\pm 0,02$  Hz i ca. halvdelen af tiden. I 96 % af tiden er afvigelsen  $\leq 0,06$  Hz, og kun



Uden dæmpetilsats i Asnæsværket.



Med tilsatsudstyr i G3.



Med tilsatsudstyr i G3 og G4.

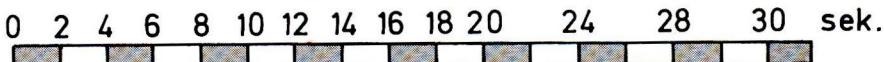


Fig. 56. Pendlinger i Sverigeslinien (effekt). Netforsøg d 29.8.1969.

i 6 promille af tiden optræder større afvigelser end 0,08 Hz. Synkrontiden afviger højst  $\pm$  5 sek. fra den astronomiske tid.

Det nordiske system for frekvensregulering er baseret på følsomme regulatorer, som styrer vandturbinernes produktion. Dampkraften deltager praktisk taget ikke i den automatiske frekvensregulering, idet dens effektregulatorer er indstillet til ikke at fungere i et bånd af størrelsesordenen 0,15—0,4 Hz omkring normalfrekvensen. Kraftkontroll i Stockholm overvåger frekvensen og griber ind ved tendens til for store afvigelser i denne eller i synkrontiden. Dette sker normalt ved at anmode om start eller stop af et vandkraftaggregat eller ved besked om omstilling til anden produktionsværdi.

En tilfældig valgt frekvenskurve er vist i fig. 57, hvor der til sammenligning er indtegnet en frekvenskurve fra ELSAM — og dermed det europæiske net.

En mere følsom skriver har registreret den i fig. 58 viste frekvenskurve — hvor der ligeledes til sammenligning er indtegnet en europæisk frekvenskurve i samme målestok inden for området 49,9—50,1 Hz.

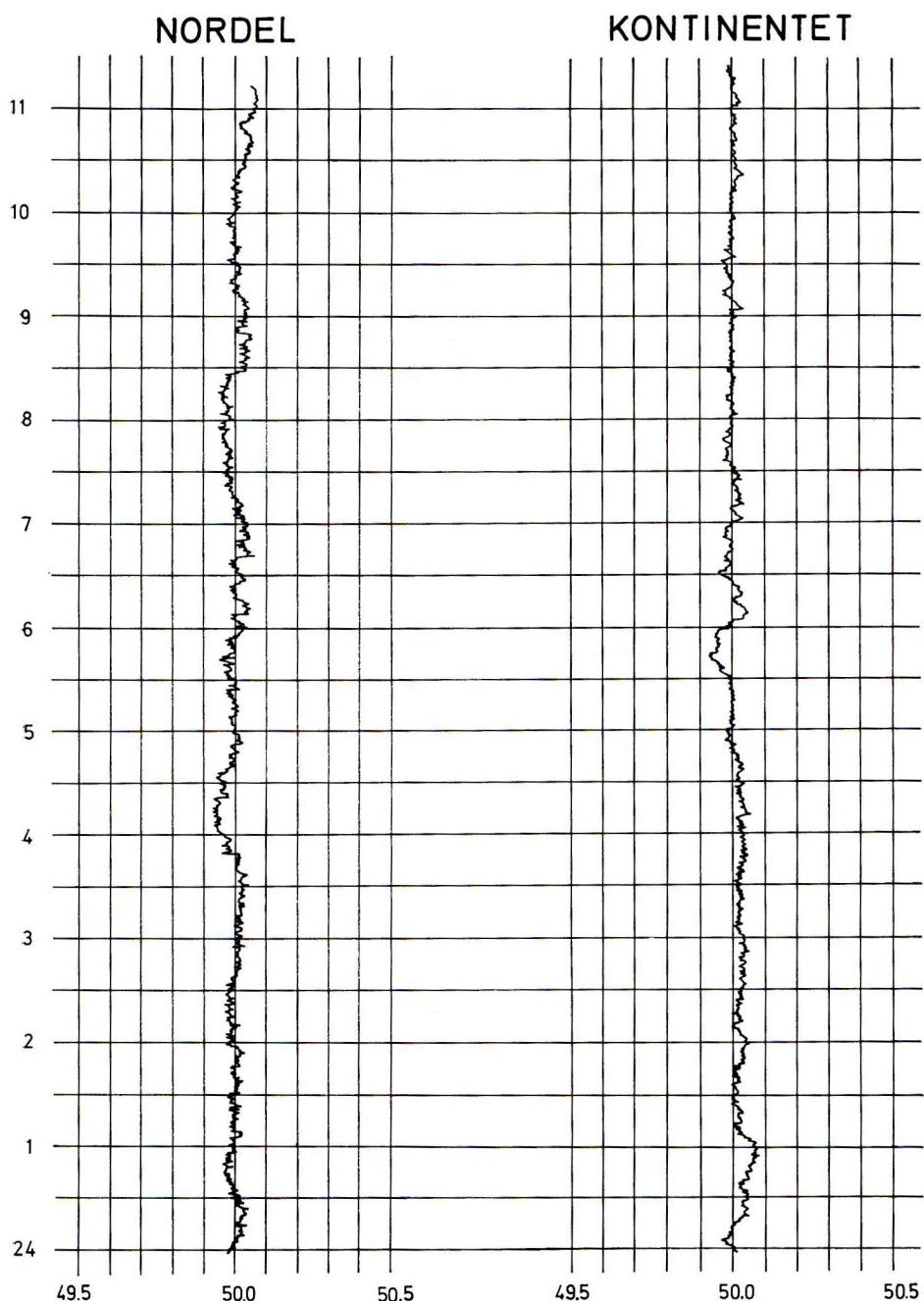


Fig. 57. Netfrekvens 28.1.1972.

Kurverne viser klart, at den nordiske frekvens fuldt ud tåler sammenligning med den europæiske trods det meget mindre samkørende system. Herudover er der i det nordiske system en væsentlig bedre synkrontid, idet man

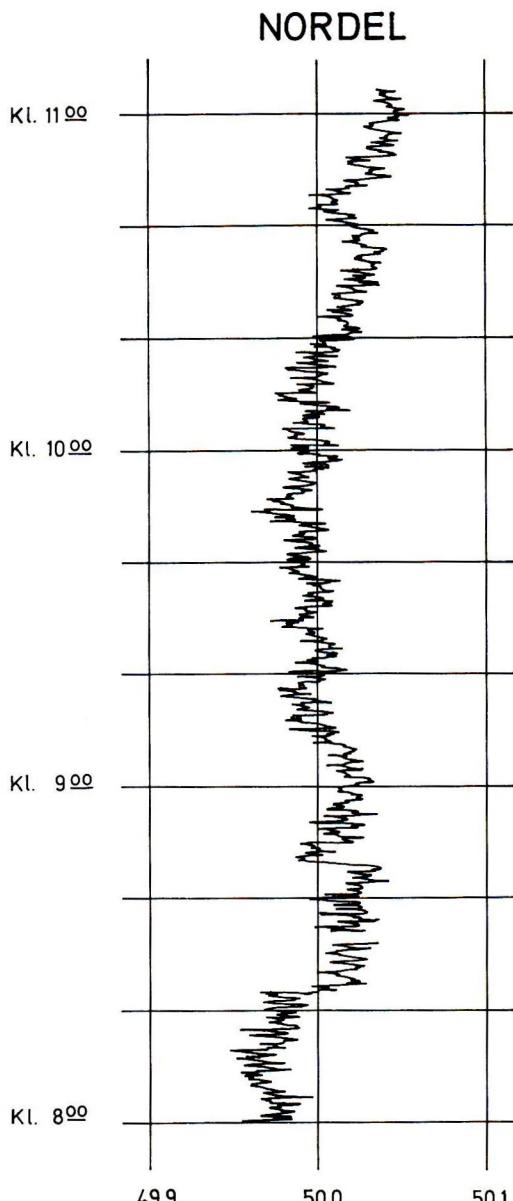
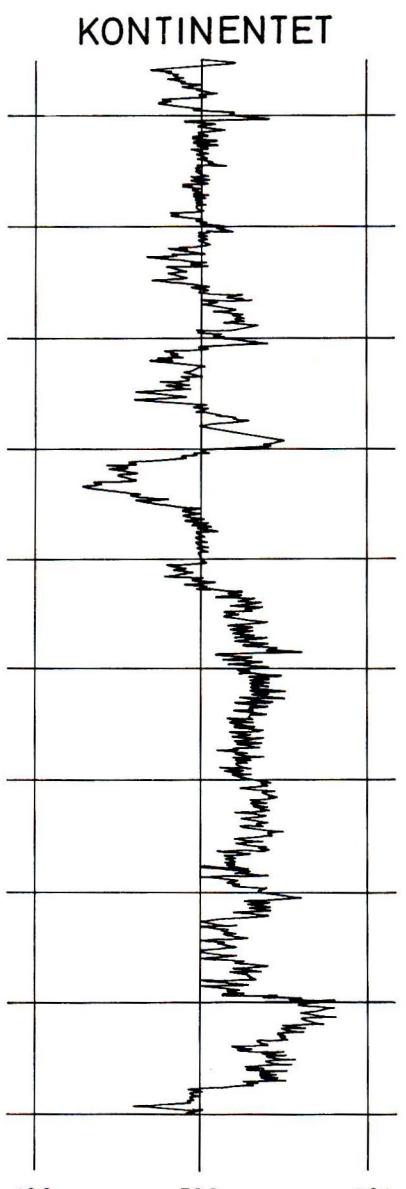


Fig. 58. Netfrekvens 28.1.1972.

på kontinentet tolererer afvigelser op til 1 minut.

En på hurtigskriver optegnet frekvenskurve er vist i fig. 59, hvor uroen i frekvensen kan studeres lidt mere detaljeret.

En frekvenskurve skrevet som en ren streg er umulig — og heller ikke ønskelig i sig selv. Tilfældige belastningsvariationer eller variationer i

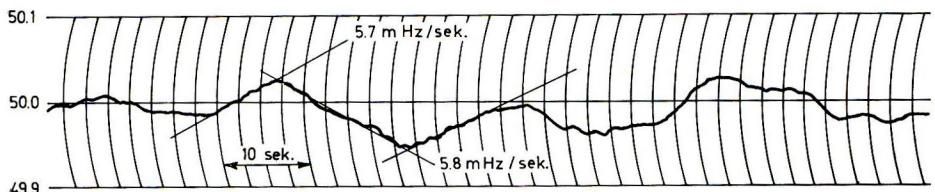


Fig. 59. Nordelfrekvens optegnet på hurtigskriver.

produktionen giver hele tiden småvariationer i frekvensen. De viser sig i overføringseffekter i samkøringsledninger som eksempelvis i kurven til højre i fig. 60, hvor man ser effektsvingninger med ca. 2 sek. mellem hver. Disse skyldes de synkroniserende effekter, som hele tiden udveksles mellem maskinerne, og som netop bidrager til at holde disse på praktisk taget samme omløbstal selv i en meget lille tidsskala. I den venstre del af fig. 60 ses en frekvenskurve med langsomme sving — 3 á 4 pr. minut — som kan henføres til en uhensigtsmæssig indstilling af effektregulatorer. Hvis der af en eller anden grund kommer et frekvensfald, vil turbineregulatorerne reagere og åbne for vand- eller dampstrømmen, så produktionen forøges. Hvis nogle af regulatorerne har en forkert tidskonstant eller et dødtbåndsområde, kan man risikere, at de kommer haltende efter de andre og får åbnet for ventilerne på et tidspunkt, hvor de andre allerede har klaret produktionsforøgelsen. Så stiger frekvensen til en for høj værdi, og der må lukkes lidt for produktionen. Under uheldige omstændigheder kan regulatorerne stå og arbejde imod hinanden, som tilfældet åbenbart har været i det nordvestlige USA. En kraftig dæmpning af regulatorerne løste problemet her.

I forbindelsen Finland—Sverige så man, at udfald af en maskine i Finland gav en transient svingning, som dæmpedes ud efter 3—4 svingninger — men så kom der en kortvarig stationær tilstand af kritisk natur. Maskineffekten i Sverige er væsentlig større end i Finland, og størstedelen af den manglende effekt kom derfor fra Sverige, når der var gået nogle sekunder, og resultatet blev en overbelastning af ledningen med spændingsfald og relæudløsninger som følge. Tilsvarende udfald i Sverige var langt mindre alvorlige på grund af de meget større maskineffekter. For at klare problemet blev der indført en styring af finske effektregulatorer via fjernmåling efter overføringseffekten, således at denne søges holdt så nær det aftalte som muligt. Denne styring arbejder med en tidskonstant af størrelsesordenen 1 minut.

Tilsvarende stor dæmpning anvendes i de svenske regulatorer, som automatisk opretholder frekvensen. Dette fremgår af fig. 58, hvor det ses, at ændringer i frekvensen kommer tilfældigt med 1/2—1 minuts mellemrum. Så længe netforholdene tillader det, er denne form for frekvensregulering ideal, idet vandkraftstationer normalt har bedst virkningsgrad omkring 80 % last

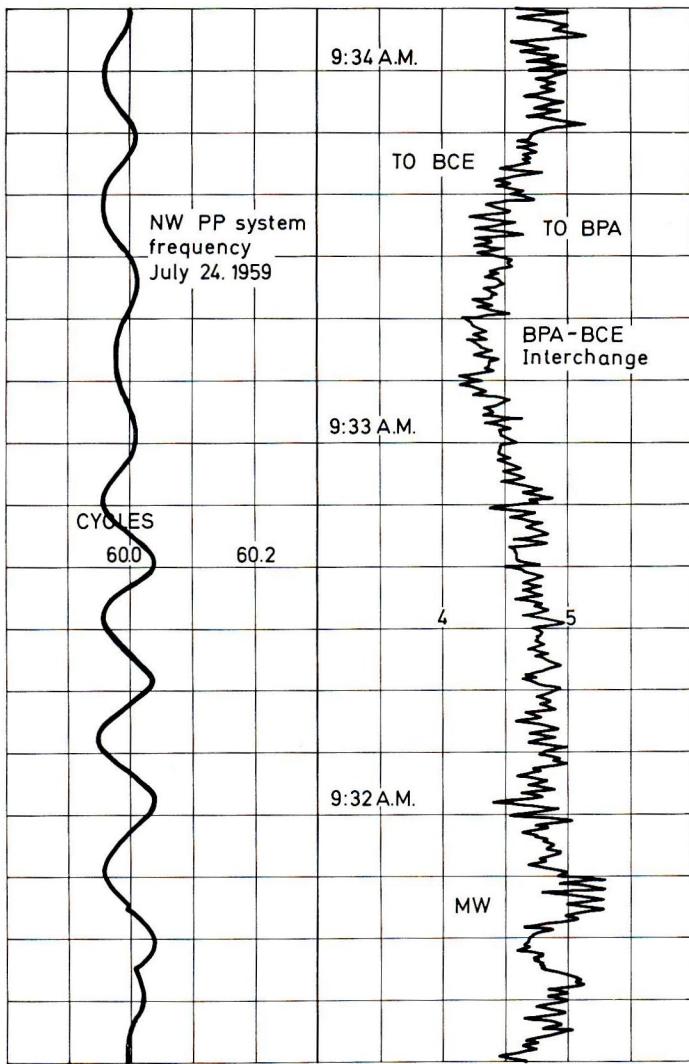


Fig. 60. Frekvens- og effektpendlinger i nordvest-USA.

og derfor er velegnede til regulering. Det forudsætter, at der findes et tilstrækkeligt antal med en fornøden stor regulerstyrke — og som nævnt ovenfor, at effektregulatorernes indstilling er koordineret.

Driftdatagruppen har foranlediget forsøg for at studere virkningen af at køre med og uden en automatisk netregulator. Det var navnlig reguleringen mellem Sverige og Norge, som havde interesse, og forsøgene viste, at netregulatoren praktisk taget ingen indflydelse havde på effektoverførslen. Den har da også været sat ud af drift i længere tidsrum. Internt i Norge styres visse delnet i Syd-vest-norge af særlige netregulatorer, som overvåger overføringen til hovednettet.

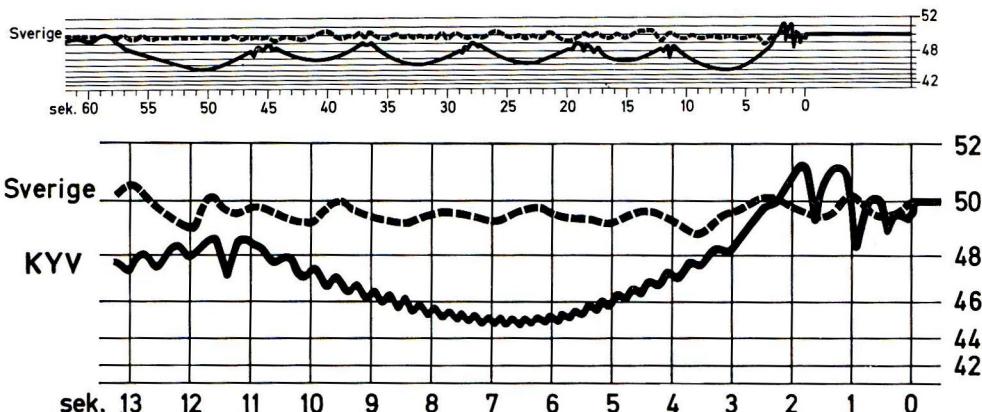


Fig. 61. Frekvensforløb på Kyndbyværket under driftforstyrrelsen d. 5.11. 1971.

På Sjælland blev i december 1970 gjort et forsøg på at køre uden døbånd på dampkraftenhederne. Dette viste en lidt uroligere kørsel på de værker, som normalt har døbånd — men iøvrigt ikke problemer på værkerne. Derimod viste det sig vanskeligt at styre effekten i en hårdt belastet linie under leverancer til Sverige.

Det kan konstateres, at der nok ikke foreløbig vil være grund til at fravige den nugældende praksis vedrørende frekvensregulering under normale driftsforhold. Dampkraftværkerne kunne uden større besvær deltage i frekvensreguleringen — for så vidt de har tilstrækkeligt følsomme effektregulatorer, og for så vidt disse gives tilstrækkelig dæmpning til at modsvare vandkraftregulatorerne.

Adskillige dampkraftværker er dog uegnede til at deltage i frekvensreguleringen. Det gælder naturligvis grundlastværker — herunder de kommende kernekraftværker — som køres på 100 % last. Det gælder endvidere sådanne værker, som kører med fuldt åbne dyser, og hvor effekten reguleres ved styring af damptrykket — den såkaldte glidetryksregulering. Derimod vil de forenklede enheder, som nu bygges, være særdeles velegnede ligesom også gasturbiner, for så vidt disse er i drift.

## Effektregulatorer

De forhold, hvorunder dampkraftens reguleringsegenskaber har størst betydning, er tilfælde, hvor frekvensafvigelser større end de normale forekommer, dvs. i forbindelse med bortfald af produktion i nettet eller omfattende driftsforstyrrelser. Et meget udpræget eksempel på virkningen af regulatorfunktionen i forbindelse med en driftsforstyrrelse er vist i fig. 61. En samleskinne-

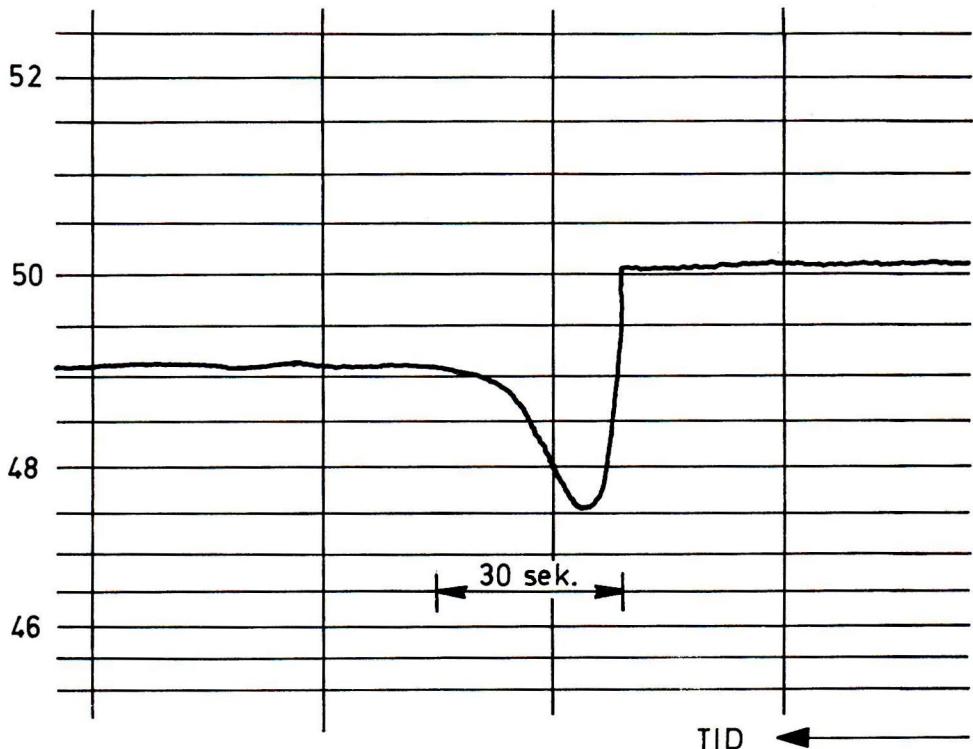


Fig. 62. Frekvensfald og regulatorfunktion efter produktionsbortfald.

kortslutning i det københavnske net forårsagede ustabile forhold mellem Sjælland og Sverige og så kraftige svingninger, at en accelerationsbegrænsere i de store 270 MW enheder på Sjælland samt på Karlshamnsværket trådte i funktion og lukkede dyseventilerne ganske kort tid efter tabet af synkroniseringen. Disse accelerationsbegrænsere er indsat for at forhindre, at maskinerne kommer på for højt omløbstal, når de under last pludselig frakobles nettet — og deres funktion i det aktuelle fejtliflæde var ikke ønsket. Resultatet var et fald i frekvens på Sjælland, indtil dysterne atter åbnede på turbinerne og bragte frekvensen på Sjælland tilbage i nærheden af den svenske. Synkronisering af de to net — som stadig hængte sammen — var mulig, men atter trådte accelerationsbegrænserne i funktion og lukkede dysterne inden for 0,2—0,3 sek., og forløbet gentog sig, ialt 6 gange inden for 1 minut. Til slut lykkedes synkroniseringen, og forholdene blev normale — men det var fascinerende 60 sekunder at iagttage, hvorledes asynkrondrift viser sig i spændingen imellem to net.

Denne driftsforstyrrelse har været lærerig i mange henseender og har yderligere focuseret interessen omkring dampkraftens dynamiske egenskaber, som

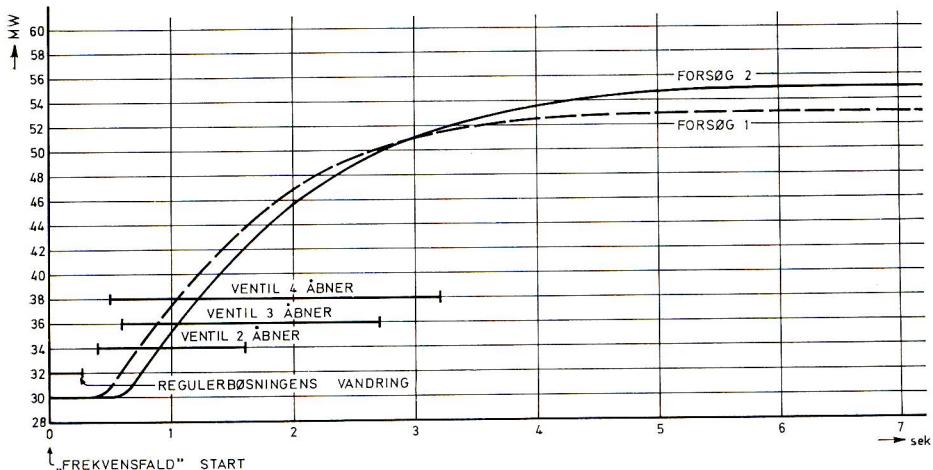


Fig. 63. MW-forløb ved et fingeret frekvensfald på Kyndbyværkets 60 MW enhed.

vi har alt for lidt kendskab til.

Der er for vandkraftens vedkommende foretaget forsøg — bl. a. i Vestnorge — for at bestemme responstiden for tilbageværende maskiner ved bortfald af store produktionsenheder, og virkelig optrædende fejl har også givet information om de dynamiske egenskaber hos vandkraftgeneratorer. Inden for et tidsrum af 10 á 20 sek. har vandkraftenheder nået fuld ydeevne ved store produktionsbortfald (jvf. fig. 62).

Tilsvarende hurtig reaktion fås fra dampkraftenheder, som er i stand til at forøge deres produktion. Dette er konstateret i praksis under driftsforstyrrelser, og forløbet er studeret ved forsøg som vist i fig. 63, hvor et pludseligt frekvensfald er simuleret. Forholdene er forskellige for turbiner uden og med genoverhedning, og det gælder i almindelighed, at genoverhedningsturbinen har ekstra tidskonstanter hidrørende fra mellemoverhederen.

Moderne regulerudrustninger, som den såkaldte turbotrolregulator, indsættes for at sikre turbinen mod for voldsomme temperaturgradienter under kørslen. De dynamiske egenskaber er ikke i fuldt omfang klarlagt, og en serie forsøg er gennemført bl. a. på Karlshamnsværket og planlagt også på Sjælland for at nå frem til et bedre kendskab til disse regulerudstrys egenskaber.

Inden for driftdatagruppen er samlet information om effektregulatorers reguler tekniske egenskaber — men meget står endnu tilbage, inden man kan karakterisere forholdene som fuldt afklarede.

Der er opstillet forenklede blokdiagrammer for karakteristiske vandkraft- og dampkraftanlæg med forskellige typer regulatorer. En fuldstændig oversigt over samtlige turbiner og deres reguleringsindstillinger (statik, tidskon-

stanter for hastighedsregulator, servomotor, dampedninger (eller vandrørs-ledninger), mellemoverheder etc.) vil indebære et overordentlig stort arbejde.

Når yderlige dampkedel (eller reaktoren i et kernekraftværk) skal betragtes, bliver arbejdet endnu mere omfattende. Det kan måske være en trøst, at man internationalt er stærkt optaget af de tilsvarende problemer — og i mange henseender ikke er nået så forfærdelig meget længere end vi inden for Nordel.

På det grundvidenskabelige område arbejder visse tekniske højskoler (f. eks. i Lund) med disse problemer (i det nævnte tilfælde i samarbejde med Sydkraft). Også atomforsøgsstationerne har taget reguleringsproblematikken op til overvejelse. Der er udarbejdet mere eller mindre komplicerede modeller til studium af BWR og PWR kernekraftværkers dynamik. Et samarbejde er under udvikling i Danmark med henblik på at udnytte forskningsinstitutternes viden og regnemæssige faciliteter på de kraftværker, som i en meget lang årrække kan forudsese at skulle regulere produktionen efter det varierende forbrug.

## Drifttekniske specifikationer for varmekraft

I naturlig fortsættelse af driftdatagruppens arbejde med at samle relevante data for eksisterende anlæg har driftkomiteen nedsat en særlig ad hoc gruppe med det formål at udarbejde drifttekniske specifikationer for kommende nye varmekraftanlæg, herunder også kernekraftanlæg. Der behandles her de krav, som fra netsiden må stilles med henblik på kørsel under lav frekvens eller lave netspændinger uden risiko for kraftværksudfall eller for stor reduktion i ydeevnen. Endvidere de krav, som kortslutninger nær kraftværker stiller til hjælpeudrustningens uformning — evt. også under forhold, hvor der sker automatisk omkobling af egetforbrugsanlæg fra en syg til en rask forsyningsskilde.

Som tidligere nævnt hører også specifikationer for regulatorer — såvel for spænding som for effekt — ind under arbejdsmrådet, så man sikrer sig de rette indstillingsmuligheder for den fremtidige drift. Endelig kan hensynet til en større deltagelse i den roterende reserve (aktiv såvel som reaktiv) få indflydelse på de specifikationer, som man måske kan nå til enighed om. En naturlig aktiv roterende reserve vil således kunne etableres, såfremt virkningsgradskurven specificeres til at have et maksimum ved f. eks. 90 % af fuldlast.

Allerede det indledende arbejde i denne nye gruppe, hvori er involveret flere deltagere fra anlægssektoren, har vist, at et samarbejde mellem driftsteknikere og anlægsteknikere vil være overordentlig frugtbart. Som grundlag for gruppens arbejde foreligger den meget omfattende "blå" udredning om

”Värmekraftens drifttekniska egenskaper”, som er udgivet af Statens Vattenfallsverk i 1969. Ud fra denne gennemarbejdning af stoffet skønnedes det på forhånd at være relativt overkomeligt at enes om fælles Nordel-spesifikationer for nye varmekraftanlæg. Diskussionerne har dog vist, at der på flere områder er principielt afvigende synspunkter, som vanskeliggør ensartede specifikationer. Eksempelvis varierer i Danmark spændingsniveauet på kraftværkerne meget mere end i Sverige — i Jylland køres under saltbelægning af isolatorerne med en væsentlig reduceret spænding på hele 150 kV nettet —, og dette afspejler sig i de krav til reguleringsområde for generatorerne, som opstilles. Ligeledes har det ført til, at danske egetforsyningstransformere er udstyret med viklingskoblere for at sikre en nogenlunde konstant spænding til al hjælpeudrustning på kraftværkerne. En gennemgang af typiske blokskemaer for kraftværker og deres egetforbrugsanlæg er iværksat med henblik på diskussion af de krav vedrørende kørsel ved lav spænding, som må stilles. Herunder drøftes også kravene til opstart af pumper, blæsere o. lign., når nettet køres i en anstrengt situation. De krav, som opstilles vedrørende start under lav spænding og/eller lav frekvens, kan få meget stor indflydelse på priserne for hjælpeudrustningen.

Et særligt problem eksisterer i PWR kernekraftreaktorer, hvor man af sikkerhedsmæssige årsager ikke har kunnet opfylde kravene i den ”blå” redegørelse om, at aggregaterne bør kunne køre i kortere tid ved 47 Hz. Medmindre der træffes særlige foranstaltninger, vil PWR kraftværksenheder blive koblet fra nettet ved 48 Hz.

Med henblik på sikring af en tilstrækkelig reaktiv effektreserve under driftsforstyrrelser må generatorens arbejdspunkt defineres i samarbejde med planlægningskomiteen under dennes overvejelser om störningsreserverne i nettet. Når netspændingen synker, vil spændingsregulatoren automatisk forøge den reaktive effektlevering, og risiko for overanstrengelse af magnetiseringskredsen og statorvikling foreligger. Spørgsmålet om at give spændingsregulatoren en frekvensafhængig indstilling, trænger til en dybere bearbejdning.

Ud over de ovenfor antydede problemer findes der en række andre spørgsmål, som kan drøftes inden for Nordel-kredsen. Der kan peges på reserveforsyning til kernekraftværker fra hus-dieselanlæg, på opdeling af egetforbrugsanlæg i sektioner, kabelføring med henblik på sikkerhedsudrustning, brandbeskyttelse o. m. m.

Endvidere udveksling af erfaringer vedrørende driftsuheld, drøftelse af styrings- og reguleringsudrustning, anvendelse af computere på kraftværker. Efter min opfattelse er der behov for en særlig Nordel-komité omfattende repræsentanter for dem, som bygger varmekraftv rkerne, og med en placering imellem Planl agningskomiteen, der giver hovedkravene til de nye

anlæg, og Driftkomiteen, som overtager de af ”Anlægskomiteen” opførte nye varmekraftværker.

## DISKUSSIONSINLÄGG

*Överingenjör LARS GUSTAFSSON, Statens Vattenfallsverk*

Det är ett mycket stort koordineringsarbete att få till stånd ett informationsutbyte av det slag Ehlert nämnde. Jag vill fråga om man i den arbetsgrupp som sysslar med detta har fått det intycket att man bemästrar problematiken och om arbetet går tillräckligt snabbt.

*Afdelingsingenjör JENS EHLERT KNUDSEN, NESA*

Något av det svåraste som finns är att lära känna den utrustning, som redan är i drift. Det har visat sig att data om de olika maskinerna och deras regulatorer känner man inte fullständigt. Frågar man tillverkarna så känner de i varje fall inte till data på de gamla enheterna. Det är ett mycket svårt arbete att samla in den information som bör finnas.

Man har därför startat med prov — först på Karlshamnsverket — och vi skall också göra en serie frånslagsprov på Själland under kontrollerade förhållanden för att studera de dynamiska egenskaper, som vi bör känna till.

Sydkraft har kopplat in tekniska högskolan i Lund, som med nya matematiska metoder söker få fram de dynamiska egenskaperna för ett helt kraftwerk och göra en modell. Detta visar att bara det att skaffa sig information är mycket besvärligt.

Vi har ingen komplett datasamling för anläggningsdelar och regulatorer. Jag är inte säker på att vi någonsin får den sådan att den passar för att ha i en databank.

*Planeringsdirektör BENGT NORDSTRÖM, Statens Vattenfallsverk*

Jag vill understryka det Ehlert var inne på att man inte kan ersätta nätabyggnader med bättre regulatorinställningar. Det är enbart ett sätt att bättre utnyttja det system vi redan har.

Jag vill också passa på och fråga om varmekraftens tekniska egenskaper.

Det är alldelvis klart att vi måste lösa frågan om vi i framtiden skall ha ett blandat system sådant att varmekraften också tar en väsentlig del av reglerarbetet.

Jag tror att det är en av de större tekniska ekonomiska frågor som vi har framför oss de närmaste åren. Den är svårbedömd från flera synpunkter. Vi kan inte göra om regleregenskaperna på de maskiner som vi redan har byggt, men det är viktigt att vi får riktlinjer för vart vi bör gå.

Jag anser att det här är en planeringsfråga. Vi måste klarlägga om det verkligen är ekonomiskt riktigt att göra de uppdimensioneringar, som man måste ha på värmekraften om den skall kunna ta över reglerfunktionen från vattenkraften. Jag tillhör dem som anser att vi inte bör starta en ny grupp inom Nordel för denna fråga. Den ligger så mellan planering och drift att det naturliga är att man börjar med en gemensam arbetsgrupp. Jag tycker att man bör få till stånd en betydligt ökad aktivitet och få en slagkraftig arbetsgrupp som utredar frågan.

För min del är jag tillfreds med att kunna konstatera att vi på Vattenfall har möjlighet att komma med ett väsentligt bidrag i denna fråga. Vi har nämligen hos oss en person som har sysslat med nätfrågor och stabilitetsfrågor i ett par år och sedan sysslat med värmekraftutbyggnaderna och värmekraftens tekniska egenskaper. Han har också lett arbetet med specifikationerna för vår värmekraft i Sverige, ett stort utredningsarbete som resulterat i den s. k. blå boken, som en del av er känner till. Jag tycker därför att vi har möjlighet att få till stånd en slagkraftig grupp och vi borde kunna knäcka problemet. Jag tror att vi kommer att kunna spara en hel del pengar åt kraftindustrin, kanske rent av mer pengar än vad många tror i dag, när man hör det här problemet och kanske tycker att det verkar att vara ett relativt trivialt tekniskt problem.

#### *Afdelingsingenjör JENS EHLERT KNUDSEN, NESA*

Det är tyvärr så att många av de problem vi står inför — speciellt störningsreservproblematiken — har vi inte verktyg för att kunna behärska tillfullto. Vi har fina stabilitetsprogram, som har utvecklats i samarbete mellan de olika företagen inom Nordel. Men när det rör sig om långa tider, flera minuter, då har vi inte verktyg längre. Jag vill nämna en fascinerande störning enligt min åsikt. Vi hade en kortslutning i Köpenhamn som låg på lite för länge innan den blev frånkopplad. Den ledde till asynkron drift mellan Själland och Sverige, som varade en hel minut. Denna hängde samman med att vi på våra ångkraftverk har accelerationsbegränsare som är till för att förhindra övervarv då aggregaten kopplas från nätet. Denna accelerationsbegränsare har alltså en funktion som i detta fall ledde till ingripanden, som icke var bra. Vi måste studera detta närmare.

Om man skall studera händelser, simulera dem på modeller, måste man ha utvecklat ett verktyg eller köpt ett. Vi får här i Norden arbeta med problem som kanske inte finns i andra länder. Vi lär oss nog inte så mycket från Europa. Där finns inget intresse med undantag av Italien, som har dessa problem mellan Syd- och Norditalien. I Amerika finns det folk som arbetat med dessa problem. Vi får lov att vara öppna och ta kontakt med andra och i möjli-

gaste mån hämta hem vad som är möjligt att få utan att offra för mycket på egen utveckling.

*Driftdirektör SVEN LALANDER Statens Vattenfallsverk*

Enligt min uppfattning är detta ett utomordentligt svårt problem. Det är fråga om systemteknik inom ett nytt område som vi ännu ej behärskar. Det borde finnas experter på andra håll i världen som har större kunskap. Enligt Ehlert finns de ej i Europa trots kraftföretagens stora forskningsavdelningar i England, Frankrike och Italien. Jag har själv intrycket att i USA tillverkarna har den bästa tekniska kunskapen inom detta område. Enligt min uppfattning kan denna form av systemteknik endast klaras av kraftföretagen som ensamma har överblicken över hela kraftsystemet. Jag tror därför att det är viktigt att vi tar vara på de begränsade resurser som finns i de nordiska kraftföretagen på området. Jag skulle också vilja fråga om man inte i Ryssland har liknande problem? De har stor kunskap åtminstone på stabilitetsområdet. Vi bör försöka lära oss av andra, innan vi sätter igång på allvar. Därigenom kan vi kanske få resurser som är tillräckligt stora för att lösa problemen i Norden.

*Afdelingsingenjör JENS EHLERT KNUDSEN, NESA*

Det är riktigt att man i Ryssland har detta problem och att man väl känner till det. Men man har aldrig berättat om det. Dessutom finns det ju språksvårigheter men vi bör penetrera det lite mer.

I Amerika vet jag att det finns expertis och jag vet också att Vattenfall har sänt över folk för att studera. Vi har övervägt att ta en lite mer intensiv kontakt med Italien och Frankrike för att få fram vad de egentligen vet och vad de gör i sina stora forskningsavdelningar.

*Planeringsdirektör BENGT NORDSTRÖM, Statens Vattenfallsverk*

Vi har utnyttjat amerikansk expertis som konsult för att tackla pendlingsproblemen, som vi från början trodde var ett svenskt problem. Det är framförallt Åke Ölwegård och Torsten Johansson som har hållit på med det här hos oss. Vi har därefter utnyttjat Concordia, General Electric, som konsult för att kolla upp och se om vi kan få ut något mer den vägen. Mina erfarenheter är mycket goda och jag har länge gått och funderat på om det inte nu är dags för Nordel att ställa sig bakom en ordentlig konsultsatsning. Ta hit ett par amerikanska konsulter och låt dem objektivt studera det nordiska nätet. Det gäller kanske inte bara de här specifika regleregenskaperna utan över huvud taget hela den utbyggnadspolitik som vi bedriver. Jag kan nämna att när vi hade Concordia här hade vi mycket diskussioner just om samköningsförbindelserna och vad man skulle behöva vidta för åtgärder för att få förbättringar i nätet. Jag skulle alltså vilja tala för att vi går fram på den

vägen att försöka få hjälp av konsult, en gemensam satsning på det.

*Direktör LARS NORLIN, Krångedegruppens Samkörning AB*

Vi har i CDL:s planeringsutskott studerat 1980-talets problem. Ekonomiskt sett har det för Sveriges del resulterat i en betydande satsning på kärnkraft. Fram till år 1985 installeras cirka 16 000 MW. Produktionen från dessa verk svarar för ca 85 % av det ökade energibehovet.

Däremot har vi icke kunnat göra mer än en stereotyp studie av regleringsmekanismen. Vi kom fram till att kärnkraften inte skulle behöva regleras. Vid en mer noggrann studie då hänsyn tas till en mängd faktorer kanske detta leder till att kärnkraften måste regleras. Den expertis vi har pratat med i Sverige anser i allmänhet att det inte är bra att kärnkraften regleras. Det är ju inte någon naturlag som säger att det är farligt utan det är fastmer en teknisk materialfråga.

*Afdelingsingenjör JENS EHLERT KNUDSEN, NESA*

Vi har i Danmark ett atomforskningsinstitut, som har gjort en modell av ett kärnkraftverk för att kunna studera dess dynamiska egenskaper. När jag hörde talas om det såde jag till projektledaren, »det er jo egentlig helt tåbeligt, at I gør det her», ty vi bygger inget kärnkraftverk inom tio år och där efter skall det köras med konstant last påföljande tio år. Vi har inget behov av en sådan modell så varför inte använda den på vanliga kraftverk. Det har man lovat överväga.

Nyligen var vi några stycken i Tyskland. Vi fick där veta att kraftverk som t ex Biblis skall man låta delta i regleringen. Man gjorde ett fel på 1950-talet då man byggde kraftverk som inte direkt kan delta i regleringen. Detta har vällat besvär när man i systemet har förlorat stora enheter. Man kommer därför att bygga sina kraftverk, konventionella som kärnkraft, så att de kan delta i regleringen och bidra med en viss störningsreserv dvs kanske köra med 95 % last. Denna mindre ekonomiska driftform var man dock villig att acceptera.