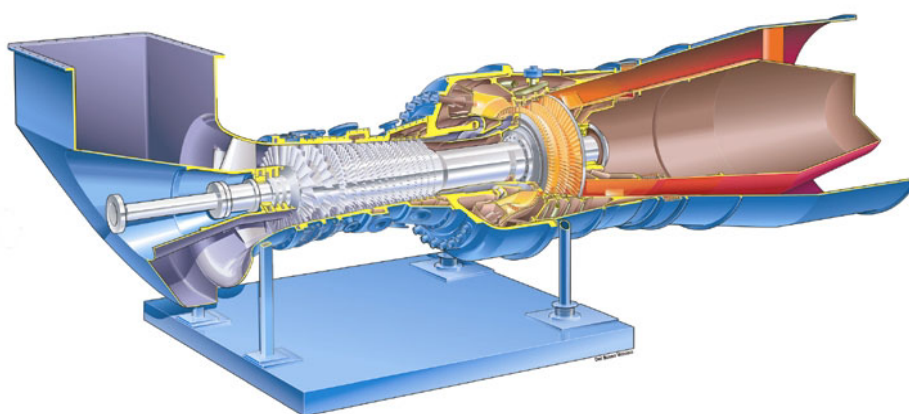


UTVÄRDERING AV GASTURBIN GTX100 I HELSINGBORG - ETAPP 3

©Svenskt Gastekniskt Center - April 2005



T. Torisson, M. Assadi, J. Klingmann, J. Arriagada & M. Genrup
INST. FÖR VÄRME- OCH KRAFTTEKNIK, LTH

Agne Karlsson
SIEMENS INDUSTRIAL TURBOMACHINERY

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

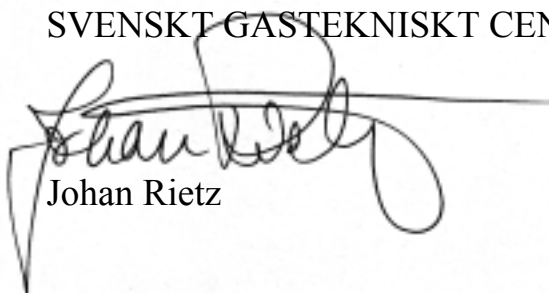
En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns på SGC's hemsida www.sgc.se.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydkraft Gas AB, Sydkraft AB, Lunds Energi AB, Göteborg Energi AB, och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Siemens Industrial Turbomachinery AB
GasTurbinkraft i Helsingborg HB
Statens Energimyndighet

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Innehållsförteckning

Sammanfattning

1 Inledning.....	1
1.1 Syfte	1
2 Västhamnsverket i Helsingborg	2
2.1 Gasturbinen GTX100	2
2.2 Ångturbinen, ATM.....	3
3 Maskinprov i Helsingborg.....	4
3.1. Initiella verifikationsprov	4
3.2. Erfarenheter och tillkommande prov.....	5
3.3 Inspektioner GTX100 Helsingborg.....	5
3.4. Fortsatt arbete	6
4. Konditionsövervakning (CMS, Condition Monitoring System)	7
4.1. Datalagringsmodulen	7
4.2. Prestandaövervakningsmodulen.....	7
4.3. Emissionsövervakningsmodulen.....	8
4.4. Vibrationsövervakningsmodulen	8
4.5. Support & analys.....	8
4.6. Ekonomi & driftsoptimeringsmodulen.....	8
4.7. Konditionsbaserat underhåll.....	8
5 ANN för Hybridanläggningen i Helsingborg.....	9
5.1. Bakgrund	9
5.2. Syfte	10
5.3. Arbetsgrupp	10
5.4. Projektbeskrivning och resultat	10
5.4.1. Kortfattad beskrivning och arbetsmetodik för ANN-relaterade arbeten.....	10
5.4.2. Delprojekt 1: Modellering av gasturbinen GTX100 med ANN.....	11
5.4.3. Delprojekt 2: ANN-baserad feldiagnostik för GTX.....	13
5.4.4. Delprojekt 3: ANN-modellering av VHV:s ångcykeln baserat på verkligt data....	17
5.4.5. Delprojekt 4: Modellering av VHV:s ångcykeln med värmebalans-programmet IPSEpro	19
5.4.6. Delprojekt 5: ANN-baserad feldiagnostik av VHV:s ångcykeln	20
5.4.7. Resultat från modellering och diagnostikstudier.....	22
5.4.8. Arbetets nyhetsvärde	22
5.4.9. Förslag på fortsatt arbete	23
6. Validering av modell för beräkning av kylda gasturbiner.....	24
6.1. Bakgrund	24
6.2. Kylmodell matchad mot data för GTX100	24
6.3. Projektstatus	24
7. Kompressortvätt	25
7.1. Bakgrund	25
7.2. Arbetsmetodik	27
7.3. Status	28
7.4. Arbetsgrupp	29
Bilaga 1	30
Ångcykelmodellering	30
Referenslista	33

Sammanfattning

Föreliggande rapport sammanfattar aktiviteterna inom uppföljningsprojektet GTX100 i Helsingborg som finansieras av Svensk Gasteknisk Center (SGC), Öresundskraft AB och Siemens Industrial Turbomachinery AB i Finspång. Rapporten sammanställer resultat från installation, drifttagning och initieffekt driftförfarenheter av Siemens gasturbin i 50 MW klassen (GTX100), i Västhamnsverket i Helsingborg. Gasturbinen och dess avgaspanna har integrerats i den befintliga fastbränsleeldade kraftverksanläggningen.

Projektet avsåg följa upp den moderna hybridanläggningen och kartlägga eventuella problem i samband med driften. Anläggningen är väl instrumenterad och insamlad mätdata används i samband med utveckling och validering av nya och befintliga analys- och diagnostikverktyg. För datainsamling, validering och diagnostik har ett konditionsövervakningssystem (Condition Monitoring System, CMS) utvecklats inom ramen för projektet. Eftersom projektet har pågått i 4 år, har effekten av långtidsdegradering kunnat studeras i viss mån. Degradation av anläggningen och effekterna därav, har studerats via insamlade mätdata och separata prestandaprov samt via årliga demontage och inspektioner av i anläggningen ingående komponenter vilket utförts av leverantören (Siemens).

Institutionen för värme- och kraftteknik deltar också i projektet och:

- har utvecklat ett verktyg för övervakning och diagnostik av gasturbinen baserad på Artificiella Neurala Nätverk (ANN). Dessutom har ett liknande verktyg utvecklats för ångturbinen och ångcykeln. Dessa verktyg kan med fördel användas för kartläggning av långtidsdegradering förutsatt att rätt driftdata från anläggningen finns tillgänglig.
- har validerat ett befintligt verktyg för beräkning av gasturbinkylningens inverkan på anläggningsprestanda.
- har genomfört litteraturstudie och sammanfattat publicerat material om kompressortvätt tillgängligt i öppen litteratur, samt bidragit till kunskapsutveckling inom området m.h.a. experiment och CFD-beräkningar (Computational Fluid Dynamics).

Mycket av arbetet på institutionen har fokuserats på att framställa modeller med faktiskt värde för såväl slutanvändare som kraftproducenter och tillverkande industrin. Projektet har genomsyrats av gott samarbetsklimat mellan industrin och universitetet, vilket har resulterat i ett fördelaktigt utbyte av kunskap och verktyg, till exempel:

- Samarbetet med *gasturbintillverkaren* har resulterat i att det har allokerats användarlicenser för beräkningsprogram för gasturbinen respektive ångturbinen på LTH. Detta har inneburit att den största delen av arbetet inkluderar implicit tillverkarens samlade erfarenhet för dessa maskiner.
- Samarbetet med *kraftproducenten* ha inneburit att LTH har haft tillgång till mätdata och specifik information om mätpunkter och insamlingsrutiner, etc. Även information om driftstrategi och anläggningshistorik har varit tillgänglig för LTH. Detta medför att i studierna tas hänsyn till de verkliga förhållanden i vilka komponenterna arbetar.
- Samarbetet mellan alla parter har gett upphov till allmänna diskussioner för identifiering av de verkliga behoven och utvecklingsmöjligheterna.

1 Inledning

Andelen gasturbinbaserad kraftgenerering har ökat markant på bekostnad av konventionell ångkraftteknik under de senaste åren. Drivkraften ligger främst i ökad verkningsgrad och låga utsläpp samt låga installationskostnader och korta byggtider. Ytterligare en faktor är den ökade tillgängligheten på naturgas, vilket är det klart dominerande bränslet.

Öresundskrafts gasturbinanläggning vid Västhamnsverket i Helsingborg är ett så kallat gaskombikraftverk, vilket innebär att gasturbinen utöver att leverera kraft till en elgenerator, utnyttjas avgasvärmen för att generera ånga till en ångturbin. Västhamnsverket är en hybrid mellan ett gaskombikraftverk och ett fastbränsleeldat kraftvärmeverk i det att ångturbinen förses med ånga både från en fastbränslepanna och gasturbinens avgaspanna.

Gasturbinen, GTX100, vid Västhamnsverket är en nykonstruktion levererad av ABB STAL AB, Finspång (numera Siemens Industrial Turbomachinery AB). För att erhålla hög elverkningsgrad och utsläppsnivåer i världsklass har ny teknik tagits i anspråk på en rad olika punkter. Gasturbinen vid Västhamnsverket var den första levererade GTX100, och även den första av sitt slag i världen.

Med ny teknik följer också viktig kunskapsuppbyggnad i branschen, hos operatören/ägaren och hos leverantören. Det är dessutom av största vikt att erfarenheter, såväl från prototypprov som verklig produktion, tas tillvara och läggs som grund för framtida underhåll samt för fortsatt utveckling/forskning. Inte minst gäller det den högklassiga gasturbinrelaterade forskningen som bedrivs vid landets högskolor.

1.1 Syfte

Huvudmålsättningen har varit att följa upp och utvärdera gasturbinprototypen GTX100 under en längre drifttid för att identifiera signifikanta egenskaper hos maskinen som verifierar dess konstruktionsdata, degenerering och driftsegenskaper samt föreslå, införa och utvärdera förbättringar i process och hårdvara. För att nå dessa mål drevs projektet som ett samarbete mellan Öresundskraft, Lunds tekniska högskola och Siemens. Projektet var uppdelat i ett antal delprojekt:

- Verifiering av gasturbinen och anläggningens prestanda
- Uppföljning av Gasturbinanläggningen under längre tid m.a.p. prestanda och tillförlitlighet.
- Regelbundna, detaljerade inspektioner för att följa ev. degradering
- Införande och verifiering av förbättringar i anläggningen
- Utvärdering av framdragning av naturgasledning i tätbebyggt område.
- Utveckling av konditionsövervakningssystem. Dels via CMS (Condition Monitoring system) och dels via ANN (Artificial Neural Network).
- Utveckling av turbinskovelkylning
- Optimering av kompressortvättprocedur.

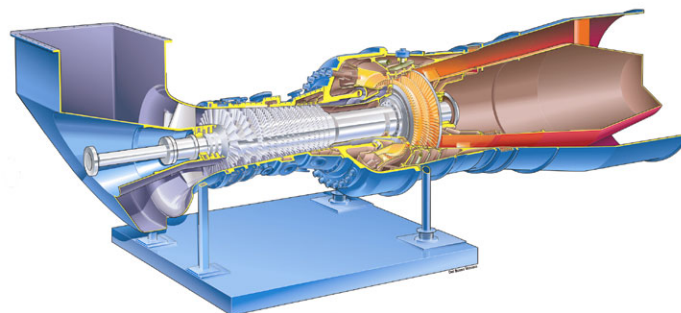
2 Västhamnsverket i Helsingborg

Västhamnsverket i Helsingborg är ett ångkraftverk, uppfört 1982, för el- och värmeproduktion med en fastbränslepanna för kol, träpellets och olja samt en ångturbin med värmeavtappning. Verket hade före tillbyggnaden en kapacitet av 64 MW_e och 132 MW_v, vilket gav ett alfavärde på 0.48. Vidare finns här en eldriven värmepump med 29 MW värmeeffekt och en hetvattenackumulator med en kapacitet på 1500 MWh. Tillbyggnad av en gasturbinanläggning med avgaspanna har ökat kraftvärmeverkets kapacitet för el- och värmeproduktion. Ångan från avgaspannan leds till befintlig, uppgraderad turbin, som dessutom förses med ånga från befintlig fastbränslepanna. Västhamnsverket tillhör kategorin hybridanläggningar eftersom ångan i anläggningen genereras m.h.a. olika bränslen. Totaleffekten för hybridanläggningen är 126,7 MW_e och 186 MW_v och systemlösningen är unik. Till exempel har alfavärdet höjts till 0.68, vilket innebär en väsentlig effektivisering och ett bättre utnyttjande av fjärrvärmenätet för elproduktion.

Utöver Västhamnsverket försörjs fjärrvärmenätet i Helsingborg av spillvärme från en kemisk industri (Kemira), som i genomsnitt levererar 27-30 MW_v, samt från hetvattencentralen "Israel", som har en kapacitet på nästan 400 MW_v. Pannorna här kan huvudsakligen eldas med olja, men naturgas kan användas i två pannor på totalt 60 MW_v.

2.1 Gasturbinen GTX100

Maskinen är utlagd för 43 MW och en termisk verkningsgrad på 37 %. Gasturbinen har även mycket låga emissionsnivåer (<15 ppm NO_x på gasbränsle).



Figur 1. Gasturbinen GTX100.

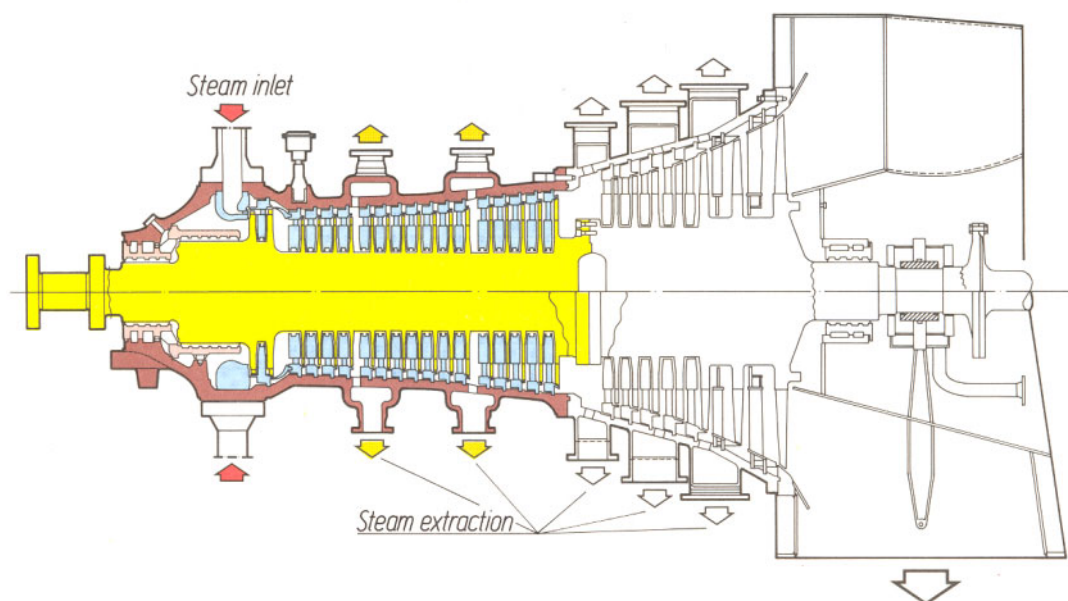
Maskinen är enaxlig och driver generatoren med den "kalla" sidan (detta innebär tex. att man kan ha en effektiv lång konisk diffusor efter turbinen, se figuren ovan). Kompressorn består av 15 steg och tryckförhållandet är ca 20, med ett flöde på ca 130 kg/s. I brännkammaren tillförs bränsleeffekt på ca 120 MW och temperaturen efter brännkammaren är ca 1200°C. Gasen expanderar sedan genom turbinens 3 steg där man erhåller ca 100 MW turbinarbete (motsvarar ett arbete på ca 550 hk per roterande skovel). Eftersom maskinen är optimerad för kombicykel är avgastemperaturen relativt hög. Då inga idag kända belastade skovelmateriel tål mer än ca 950°C, är turbinens 2 första steg luftkylda.

Den första GTX100 (produktionsprototypen) levererades till Helsingborg under 1999 och tog i drift för de första verifieringsproven senhösten 1999. För närvarande, december 2004, finns det 13 st GTX100 i kommersiell drift, varav 6 med mer än 20 000 timmars drift.

2.2 Ångturbinen, ATM

Ångturbinen som används i botten-cykeln är den ursprungliga axialturbinen, från uppförandet av Västhamnsverket. I och med att verket byggdes om för kombidrift, modifierades ångturbinen för att kunna släppa igenom bidraget från kombipannan, med bibehållna admissionsdata. ATM-maskinen är en oväxlad fullvarvsmaskin med låg reaktionsgrad, som utvecklades i Finspång, av dåvarande STAL-LAVAL (numera Siemens Industrial Turbomachinery AB) under slutet av 1970-talet. Ångturbinen har i detta utförande partialpådrag, med symmetriska pådragsbågar (1+1, 1, 1) och ett Curtis-steg. Maskinen är försedd med tre avtappningar till högtrycksförvärmaren, matarvattentanken och lågtrycksförvärmaren. Vidare används två värmekondensorer i traditionell två-stegs koppling och flödena separeras med Baumannsteg (2 + 3). Totala antalet steg är 25. Denna turbintyp har ett välförtjänt rennomé som robust och mycket driftsäker, med litet underhållsbehov.

Ångturbinen anpassades för det ökade ångflödet, innan gasturbinen togs i drift, genom att öka bågarean i reglersteget samt ny beskovling i resterande turbinen exklusive Baumann-stegen¹. Denna modifiering innebär bland annat att relationen mellan stegtryck och flöde genom ett visst steg inte är samma efter ombyggnaden. På grund av detta kommer endast mätdata efter ombyggnaden att användas i projektet.



Figur 2. ATM maskin i kondensutförande.

¹ Steg där kanalen är delad i radiell ledd för optimal aerobelastning och delning av flödet till respektive kondenser med dess tryck

3 Maskinprov i Helsingborg

Gasturbinanläggningen i Helsingborg har, förutom ren energiproduktion, utnyttjats för verifikationsprov av den nyutvecklade gasturbinen, GTX100, samt för utveckling och verifikation av förbättringar. Grundproven genomfördes under åren 1999-2000, varefter ett antal kompletterande prov utförts.

Under utveckling av en ny gasturbin genomförs en rad beräkningar, simuleringar och prov av såväl komponenter som delsystem. Den extremt höga belastningen av materialen och komplexitetsgraden hos systemen (kylning, förbränning etc.) medför trots detta att den kompletta maskinen/systemet måste slutgiltigt verifieras via fullskaleprov. Huvudmotiven till dessa fullskaleprov är att verifiera start- och driftparametrar, styr-, regler- och hjälpsystemen funktion samt att verifiera belastning och livslängd på gasturbinens ingående komponenter.

Maskinen har provats under alla de normala lastfall som förutses och för både gasbränsle och flytande bränsle. Mätresultaten har dels utvärderats kontinuerligt under pågående mätning dels sparats för framtida utvärdering och som referens. Mätningarna har också varvats med inspektioner för att komplettera mätresultat och för att verifiera komponenternas status.

3.1. Initiella verifikationsprov

Under sommaren -99 levererades gasturbinen från Finspång för uppställning på Västhamnsverket i Helsingborg. Inledande provning av maskinen startade under hösten. Maskinen var försedd med en omfattande instrumentering, över 1800 mätpunkter, för utvärdering av konstruktionen. På plats i Helsingborg har ett antal personer från Siemens arbetat med utvärdering av mätningarna samtidigt som en omfattande utvärderingsarbete har utförts i Finspång.

Prototypmätssystemet huvuddelar omfattade:

- Strukturmätningar (temperaturmätningar på alla komponenter, vibrationsmätning på skovlar, rotor, hus växel mm, rotordynamiska mätningar av gasturbin, växel och generator mm.)
- Prestanda och aerodynamikmätningar (t.ex. tryck i gaskanal och sekundärluftsystem, luftbränsleflöden, strömningsvinklar, toppspelsmätningar, mm.)
- Förbränningsmätningar (flamtemperaturer, bränsle, pulsationsmätning, mm.)
- Emissionsmätning (NO_x, CO, CO₂, O₂, UHC, mm.)
- Standard driftinstrument

De inledande prototypproven omfattade:

- Prov av startsystem upp till tomgång
- Driftagningsprov av generatoren och dess system
- Lastprov till fullast på gas- respektive oljebränsle
- Övervarvsprov
- Prestandaprov
- Förbränningsprov för alla laster
- Transientprov (regleringskaraktäristik)

Prototypprovet avslöjade inga allvarliga problem med maskinen, utöver de man kan förvänta sig med en maskin av denna komplexitetsgrad, utan begränsades till mindre justeringar av t ex sekundärluftssystemet. Vissa förväntade akustiska fenomen i brännkammaren identifierades och arbete genomfördes för att lösa dessa.

Under år 2000 fortsatte provningen med inriktning på brännare, brännkammaren och instabilitets gränser för förbränningen. Ett "500-timmarsprov" genomfördes under senare delen av sommaren för att visa maskinens egenskaper och tillförlitlighet. Maskinen togs därefter till Finspång för detaljerad inspektion samt installation av mätinstrument för fortsatta detaljerade prov av framförallt roterande heta delar, samt verifikationsprov för kvalificering enligt gällande normer. Under år 2001 genomfördes kompletterande prov med fokus på brännare och flytande bränsle med syfte att optimera drift och emissionsnivåer [22,23].

Det egentliga prototypprovet avslutades sommaren 2001. Vid den tidpunkten hade gasturbinen körts 200 starter och 955 drifttimmar samt producerat ca 31 GWh. Efter prototypproven togs vissa delar av den extra mätutrustningen bort för att inte äventyra maskinens framtida driftsäkerhet/tillgänglighet.

3.2. Erfarenheter och tillkommande prov

Som slutsats kan man säga att GTX100 är en mycket bra maskin som ger den prestanda som den var designad för. Vissa problem upptäcktes, men dessa var helt inom vad som kan anses som acceptabelt för en så avancerad maskin. Med "avancerad maskin" menas att alla tillgängliga teknikdiscipliner är inblandade till sin spets.

Inom uppföljningsprojektet har maskinens prestanda och degradering mm. följts upp under åren 2000-2004 för att utvärdera maskinen i det längre perspektivet [24-27]. Vidare har även ett antal prov utförts för med avsikt att vidarutveckla och verifiera gjorda uppgraderingar. Det senare ligger dock utanför detta projekt och redovisas därför inte här.

Den totala energiproduktionen för gasturbinanläggningen i Helsingborg har, på grund av energiekonomiska orsaker, varit liten. Detta har medfört att den planerade studien av långtidseffekter, degradering etc. av gasturbinen i Helsingborg har blivit något begränsad. För att kompensera detta har vissa delar av långtidsuppföljningen även genomförts på andra levererade GTX100 med längre drifttider.

3.3 Inspektioner GTX100 Helsingborg

För att fastställa och följa degraderingen hos, framförallt de heta, delarna i gasturbinen har gasturbinen demonterats helt eller delvis vid ett antal tillfällen [28-43]. I vissa av dessa tillfällen har extra inspektion genomförts i samband med att någon modifiering införts. Minst en gång årligen har maskinen demonterats och undersökts i detalj på Siemens verkstad. Vid dessa inspektioner har samtliga ingående delar inspekterats visuellt med avseende på eventuella avvikelser. Speciellt har turbinskovlar, ledskenor, brännare och brännkammare undersökts och provats med avseende på defekter, oxidation, korrosion, försmutsning och nötning/förslitning. Vidare har någon/några skovlar/ledskenor från vart turbinsteg tagits ur för förstörande materialprov/undersökning.

Sammanfattat kan sägas att komponenternas kondition vid alla tillfällen varit god och att degraderingen, med något undantag, varit försumbar. Dessa inspektioner, utförda på maskinen i Helsingborg tillsammans med motsvarande inspektioner på andra GTX100, har utnyttjats för att verifiera beräknad degradering och livslängder.

Vid slutet av år 2004 har GTX100 i Helsingborg ackumulerat en drifttid på ca 6000 timmar och ca 550 starter. Motsvarande för de GTX100-maskiner som utnyttjats parallellt för utvärdering är 20 000-25 000 drifttimmar samt något över 200 starter.

3.4. Fortsatt arbete

För GTX100 i Helsingborg och de GTX100 som passerat första ordinarie huvudinspektion/service (20 000 timmars drift) har de komponenter som visat för tidig degradering bytts ut mot uppgraderade komponenter, varför särskild uppföljning av dessa kommer att fortsätta under ett antal år.

4. Konditionsövervakning (CMS, Condition Monitoring System)

Inom ramen för uppföljningsprojektet har ett system för hantering och utvärdering av driftsparametrar utvecklats. Avsikten med systemet är att via analys av mätdata;

- Detektera degradering och andra avvikelser i funktionen för planering av service och underhåll. (t.ex. kompressortvätt)
- Ge underlag för driftsoptimering av anläggningen
- Ge underlag för prediktion av komponenters förbrukade och kvarvarande livslängd, baserat på faktisk driftprofil.

Systemet är uppdelat i ett antal moduler. Grundmodulen består av ett datalagringssystem vilket läser och lagrar alla driftmätvärden och signaler, Vidare omfattar systemet ett antal analysmoduler. Analysmodulerna baseras på analytiska metoder för prediktering av prestanda, emissioner, vibrationer etc. Analysverktygen är baserade på designunderlaget för respektive maskintyp. Via modulerna kan man bl.a. generera ett antal standardrapporter, utföra trendanalyser och studera normaliserade data [44-48]. Inom pågående projekt var endast de tre första modulerna planerade att vara färdigställda.

Systemet är tänkt att övervaka och lagra data under hela anläggningens livslängd. Detta ställer mycket höga krav på databasens rutiner för sampling och kompression av lagrade data, utan att förlora mätnoggrannhet. Den ursprungligt använda databasen visade sig inte fullt uppfylla målen, varför nytt datalagringssystem tagits fram och CMS-databasen bytts ut i de anläggningar som haft den tidigare databasen.

4.1. Datalagringsmodulen

Grundmodulen i CMS är datalagringsmodulen vilken läser och lagrar mätdata från alla driftinstrument och signaler, totalt ca 300 analoga mätvärden samt ca 900 till/från signaler. Grundmodulen kan även hantera kommunikation av mät- och analysdata till operatören eller leverantören via tele eller datanätet. Modulen innehåller även en enklare form av analysverktyg i form av visualisering av trender mellan olika signaler etc. Grundmodulen är färdigutvecklad och i drift.

4.2. Prestandaövervakningsmodulen

I prestandamodulen beräknas och övervakas maskinens prestanda i form av verkningsgrad, massflöde, gastemperatur mm. I modulen bearbetas mätdata till att utgöra underlag för att avgöra degradering och behov av service (t.ex. kompressortvätt), samt som underlag för ekonomisk driftsoptimering [16]. Modulen baseras på traditionella mass- och värmebalansmetoder samt geometri och karaktäristika för GTX100. Genom att analysen baseras på Siemens konstruktionsunderlag för GTX100, kan inte bara totalprestanda utvärderas, utan även degradering eller avvikelser i prestanda hos de enskilda komponenterna. Beräkningsdelen i CMS består huvudsakligen av två program båda utvecklade av Siemens i Finspång. Det första av dessa är ett utvärdering program baserat på traditionella mass- och värmebalansmetoder. Det andra huvudprogrammet beräknar aerotermodynamiska parametrar för ett antal karaktäristiska snitt och övriga storheter (t ex verkningsgrader, vidheter etc.). Styrkan med dessa program är att de är uppbyggda på både traditionella metoder och på maskinspecifika data, tex geometridata, förlustunderlag och komponentkaraktäristik, vilka beskriver GTX100. Maskinspecifika data hör till information som inte är tillgänglig utanför Siemens. Prestandaövervakningsmodulen finns färdigutvecklad och i drift.

4.3. Emissionsövervakningsmodulen

I emissionsmodulen beräknas och övervakas maskinens emissionsprestanda i termer av NO_x, CO, CO₂ och O₂ [17]. Emissionsmodulen finns färdigutvecklad och i drift.

4.4. Vibrationsövervakningsmodulen

I vibrationsmodulen beräknas och övervakas maskinens rotordynamiska egenskaper. I grundmodulen lagras endast grundläggande vibrationsdata som totalnivåer. I vibrationsmodulen utförs en utökad analys av signalerna från vibrationsgivarna som t.ex. amplitud och fasinnehåll, FFT analys och harmoniska komponenter [18]. Dessa data, kombinerat med Siemens underlag för GTX100, medger att inte bara ändringar i vibrationsnivåer kan detekteras, utan även att orsaken kan identifieras.

Modulen finns färdigutvecklad och i drift.

4.5. Support & analys

Support & analys omfattar huvudsakligen en serviceorganisation och ett antal analysverktyg hos Siemens för att via datalänk till CMS-systemet analysera driftdata, lagrade såväl som i realtid, för problemlösning och/eller rådgivning till kund. Support & analysfunktionen finns i drift.

4.6. Ekonomi & driftsoptimeringsmodulen

Med kännedom om yttre kostnader/intäkter (bränslepris, el-pris, emissionsavgifter etc.) kan en ekonomiskt optimal drift beräknas baserat på analyserade data från övriga moduler i CMS-systemet som anläggningens aktuella prestanda, degradering/slitage som funktion av driftprofil etc. Denna modul är i utvecklingsskedet.

4.7. Konditionsbaserat underhåll

Service och underhåll av gasturbinanläggningen baseras idag huvudsakligen på drifttimmar och antal starter (ekvivalenta drifttimmar) samt inspektion av enskilda komponenter i samband med dessa servicetillfällen. Varje enskild komponents degradering beror dock av körprofilen, andel dellaster och nivåer, cykling mellan laster, starter, stop, tripp samt bränslekvalite, omgivningstemperatur etc. Med kännedom om driftdata, vilka lagras och utvärderas via CMS-systemet, samt Siemens konstruktionsunderlag och erfarenheter för GTX100, kan såväl förbrukad som kvarvarande livslängd hos varje enskild komponent predikteras. Med kännedom om kvarvarande livslängder kan servicetillfällen och servicekostnader optimeras med hänsyn till planerad drift. Alternativt kan körprofilen justeras för optimal driftsekonomi. Denna modul är i utvecklingsskedet.

5 ANN för Hybridanläggningen i Helsingborg

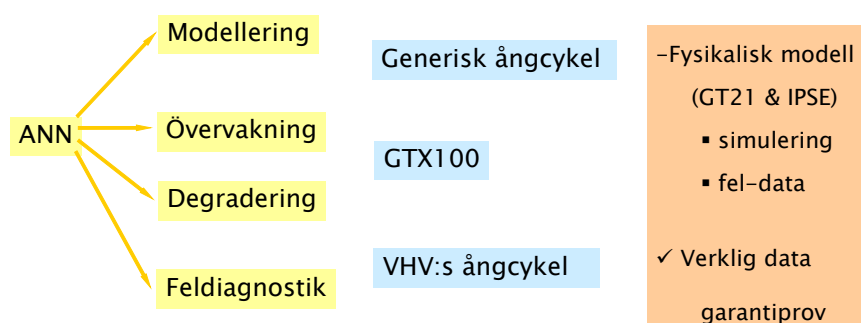
5.1. Bakgrund

Dagens avreglerade elmarknad ställer högre krav på tillgänglighet, samtidigt som komponenterna i moderna kraftverksanläggningar belastas allt hårdare för att nå högre verkningsgrad. För att klara av dessa krav behövs tillförlitliga övervaknings- och diagnostiseringssystem där processernas tillstånd samt nödvändiga åtgärder för upprätthållande av den höga verkningsgraden kan styras med hjälp av mätdata. Idag baseras de vanligaste övervakningssystemen på värme- och massbalansprogram med fysikaliska modeller av komponenterna. Tillverknings-specifika data används för ökad noggrannhet i beräkningar vilket i sin tur ökar tillförlitligheten av diagnoserna (se föregående kapitel). Det bör dock nämnas att kraftverksägarna normalt inte har tillgång till verktyg innehållande komponentspecifik information. Därför finns ett starkt intresse hos kraftproducenter för övervakning och diagnostikverktyg baserade på anläggningsdata, som kan anpassas till deras anläggningar.

Kartläggning av prestandadegradering är ett annat viktigt område som intresserar kraftproducenterna, eftersom anläggningen utsätts för slitage, försmutsning och termiska och mekaniska belastningar efter en tids drift. Det som behövs är ett intelligent system för kontinuerlig övervakning och diagnostisering som kan anpassas till de nya förhållandena. Artificiella Neurala Nätverk (ANN) har visats vara ett värdefullt verktyg för den här typen av applikationer.

Uppmärksamheten kring ANN och dess möjligheter att utgöra grunden i ett expertsystem har ökat kontinuerligt under de senaste åren och SGC/Siemens projektet har gett LTH en unik möjlighet att validera ANN-verktyget mot en verklig anläggning, d.v.s. hybridanläggningen i Helsingborg.

I figur 3 sammanfattas LTHs ANN-aktiviteter inom projektet. Som det framgår av figuren har ANN-tekniken använts för modellering, övervakning av drift och anläggningsdegradering, samt för feldiagnostik.



Figur 3. LTH:s aktiviteter relaterade till ANN-tekniken inom projektet.

5.2. Syfte

Det primära målet med studien var att utvärdera ANN-verktygets möjligheter och begränsningar beträffande anläggningsövervakning, prestandabestämning och feldiagnostisering. Detta genomfördes via utveckling och anpassning av ANN-verktyget till hybridanläggningens huvudkomponenter, med speciell fokus på gasturbinen GTX100.

Det övergripande syftet är att öka tillgängligheten och reducera drift och underhållskostnaderna genom behovsbaserat underhåll som sammankopplar prestanda, emissioner och de ekonomiska villkoren. Vidare effektiviseras och förenklas övervakningen av anläggningen.

5.3. Arbetsgrupp

Arbetsgruppen från LTH har bestått av Mohsen Assadi (handledare), Jaime Arriagada (forskningsassistent), Pernilla Olausson (forskningsassistent), samt Magnus Genrup (doktorand). Teknologerna Claes Hellberg och Markus Truedsson har genomfört sina examensarbeten som utgjorde en del av här aktuella projekt.

5.4. Projektbeskrivning och resultat

5.4.1. Kortfattad beskrivning och arbetsmetodik för ANN-relaterade arbeten

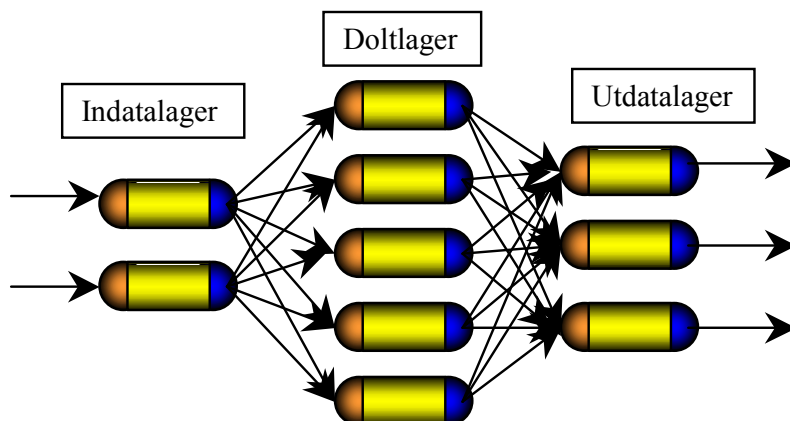
I en inledande fas studerades användningen av ANN för simulering av gasturbinen GTX100. Målet var att se om ANN lyckades ”fånga upp” gasturbinens karakteristik. Resultaten från dessa studier visade att ANN var kapabelt att prediktera gasturbinens prestanda. Senare vidareutvecklades ANN-modellerna för att även utföra feldiagnostik på samma gasturbin. Feldiagnostisering genomfördes m.h.a. data simulerade med GTX100:s designverktyg då data för gasturbin behäftad med fel saknades.

Efter dessa studier upprepade projektgruppen samma metodik för ångcykelstudier. Även här saknades feldata för anläggningen, och därför utvecklades en detaljerad fysikalisk modell (som beskrivs nedan) över ångcykeln i värmebalansprogrammet IPSEpro. Ångcykelmodellen har validerats mot tillgänglig mätdata från garantiprov på anläggningen. Modellen användes sedan för generering av feldata för träning och utveckling av en ANN-modul för feldiagnostik på ångcykeln. Efterföljande tester visade att ANN-verktyget kunde identifiera de simulerade felen med hög noggrannhet och träffsäkerhet.

Parallellt med feldiagnostisering utnyttjades befintlig mätdata på ångcykeln för utveckling av en ANN-modell över ångcykeln. Testresultaten visade att ANN modellen predikterar ångcykelkarakteristiken med bra noggrannhet och att modellen skulle kunna utnyttjas för on-line övervakning av anläggningen.

Arbetsmetodiken inom projektet har varit en kombination av teoretiska studier, utveckling av egna ANN-program och användning av kommersiella ANN-program. Projektet inleddes med en omfattande litteraturstudie inom området, som resulterade i en såväl bred som djup förståelse för den matematiska bakgrunden [1]. Litteraturstudien har sedan fortsatt under hela projektiden. Vidare omfattade studien utveckling och optimering av ANN-modeller, utvärdering av kommersiella program, samt tillämpning och validering av modellerna på kraftverkskomponenter.

På grund av omfattningen på teknikområdet artificiell intelligens, har arbetet på LTH begränsats till att omfatta en viss typ av ANN som anses vara lämpligast för kraftverksapplikationer, nämligen framåtkopplade ANN ("feedforward neural networks", se figur 4). Olika algoritmer och inlärningsmetoder har testats och de olika parametrarnas inverkan på konvergenstid och lösningens noggrannhet undersökts [2, 3].

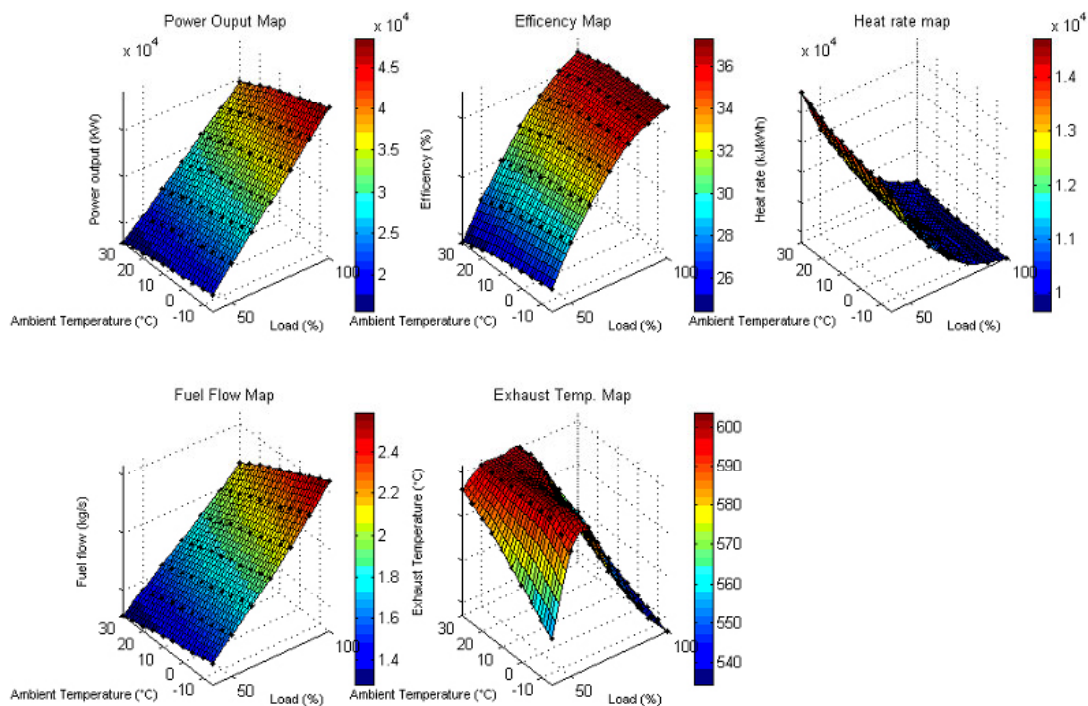


Figur 4: Exempel på dataflöde i ett framåtkopplat ANN, med 2 neuroner i indatalagret, 5 neuroner i det dolda lagret och 3 neuroner i utdatalagret.

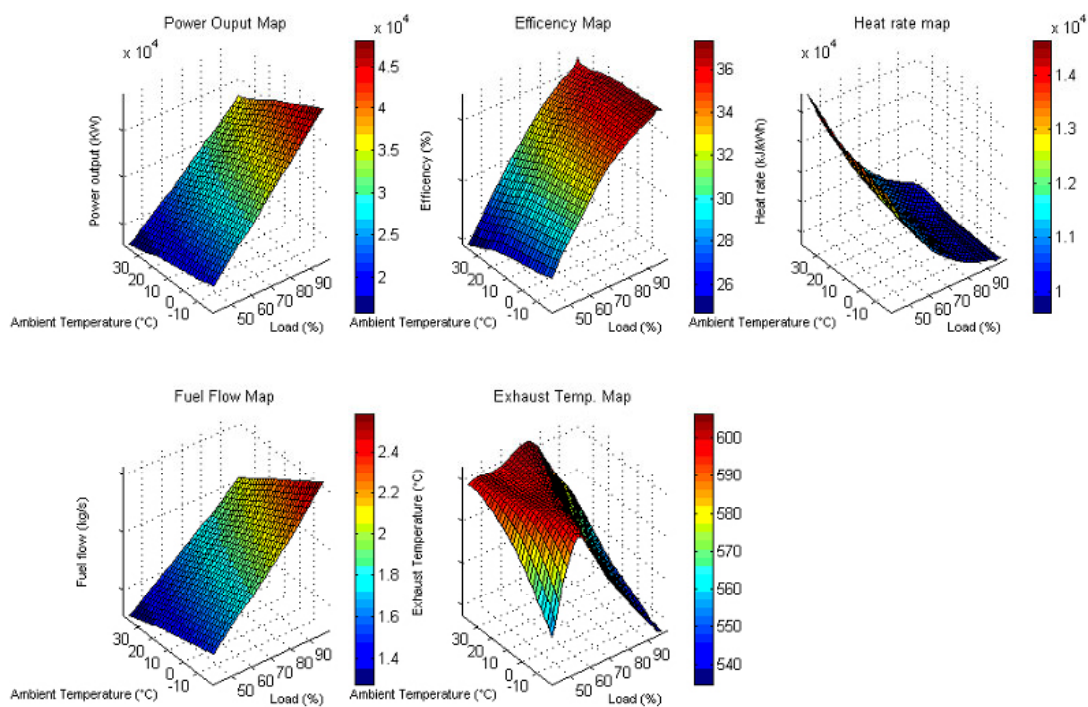
5.4.2. Delprojekt 1: Modellering av gasturbinen GTX100 med ANN

I en inledande fas, som var färdig 2001, testades ANN-verktyget och dess förmåga att modellera gasturbinen GTX100 och dess karakteristiska parametrar (uteffekt, termisk verkningsgrad, massflöde och avgastemperatur) som funktion av last och omgivningsförhållanden. För modelleringsarbetet krävdes anläggningsdata insamlade under varierande drift- och omgivningsförhållanden. Eftersom gasturbinen på Västhamnsverket inte har ackumulerat tillräckligt med drifttimmar, användes gasturbintillverkarens (Siemens) designverktyg GTPERFORM för generering av träningsdata för ANN-modellen. Figur 5 och figur 6 visar prestandakartor framtagna med designverktyget och ANN-modellen. Som det framgår av jämförelsen klarade ANN-modellen att återskapa gasturbinens karakteristikan med bra noggrannhet. Även starkt olinjära betenden som GTX:s oregelbundna avgastemperatur profil kunde återskapas av ANN-modellen.

En av de viktigaste fördelarna med ANN-modellen var att den krävde betydligt kortare beräkningstider jämfört med den fysikaliska modellen. Den här inledande studien visade också att man kunde bygga skräddarsydda ANN-modeller för olika gasturbiner med bra noggrannhet förutsatt att data finns tillgänglig [7, 8].



Figur 5. Prestandamappar enligt GTPERFORM.



Figur 6. Prestandamappar enligt ANN-modellen.

5.4.3. Delprojekt 2: ANN-baserad feldiagnostik för GTX

Under den andra fasen av ANN-studier utnyttjades ANN:s mönsterigenkänningssegenskaper för feldiagnostisering på gasturbinen. En central punkt i studien var att undersöka om ANN var kapabelt att identifiera felen innan de var fullutvecklade, något som kan användas för generering av tidiga larmsignaler till operatörerna. Även kartläggning av komponent degradering inkluderades i studien. Med ett sådant system skulle underhållsarbetet kunna optimeras och onödiga driftstopp elimineras. Den här studien avslutades år 2003 och de publicerade resultaten återfinns i referenserna [4, 15].

Metodiken för implementering av det ANN-baserade feldiagnostiksystemet beskrivs nedan:

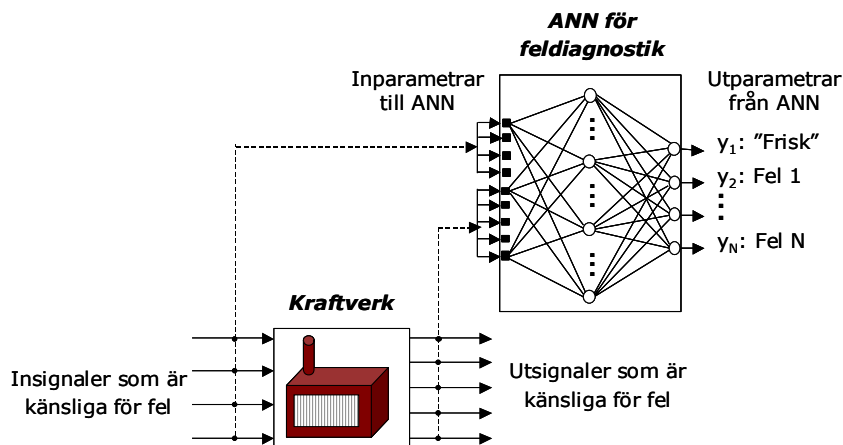
1. En databas innehållande driftdata och simulerade data vid olika fel skapades med hjälp av gasturbintillverkarens designverktyg.
2. I nära samarbete med experter från Siemens identifierades de parametrar som påverkar gasturbinens "hälsotillstånd". Därefter genererades värden via simulering för att träna ANN-verktyget för feldiagnostik.
3. Data arrangerades i en tabell där varje rad bildar ett speciellt mönster som kan relateras till ett specifikt fel.

Inparametrar till ANN				Targets
Parameter 1	Parameter 2	Parameter 3	Parameter 4	Fel nummer
12.42	120.00	98.23	0.12	1
13.54	122.13	97.05	0.05	1
21.32	120.04	56.04	0.005	1
...	...	...	...	...
12.45	70.04	100.05	0.14	4
12.78	67.98	96.99	0.16	4

4. En delmängd av data från databasen valdes slumpmässigt för träning och validering av ANN. Resterande data användes för validering av den färdigtränade ANN-modellen.
5. När träningen var klar och testresultaten ansågs vara tillfredställande sparades ANN:s parametrar, d.v.s. viktmatriser, antal dolda neuroner, etc.. Ett flertal ANN-modeller skapades och sparades. Efter ytterligare test valdes den bästa ANN-modellen (minsta avvikelse) som utgör feldiagnostiksystemets huvuddel.

Något förenklat kan man säga att ANN tränas att känna igen den "friska" anläggningen samt olika "sjuka tillstånd".

Feldiagnostiksystemet består då av en ANN-modul som kopplas till kraftverket (i det här fallet GTX100). All relevant mätdata skickas som indata till ANN-modulen som avgör maskinens tillstånd (se figur 7).



Figur 7. Uppbyggnadsprincip för feldiagnostik med ANN.

Som det har nämnts tidigare, data för träning av ANN-feldiagnostikmodulen för gasturbin genererades med gasturbintillverkarens egna simulering och designverktyg. Olika parametrar har manipulerats med hjälp av dessa verktyg för att simulera de fel som ANN-verktyget ska lära sig. En "frisk maskin" och tio tillstånd behäftade med fel har simulerats vid olika omgivningstemperaturer (-30, -10, 10 och 30°C) och laster (100, 90, 80 och 70%). Dessutom simulerades felen vid olika utvecklingsstadier (s.k. "felnivåer"), från begynnelse till fullt utvecklade fel. Vid valet av fel som skulle inkluderas tillämpades följande kriterium:

- De måste vara realistiska och vanligt förekommande i industriella gasturbiner
- Både fel och degradering inkluderas i modellen
- Felen påverkar alla huvudkomponenter i gasturbinen, d.v.s. kompressorn (K), brännkammaren (BK) och expander (T).

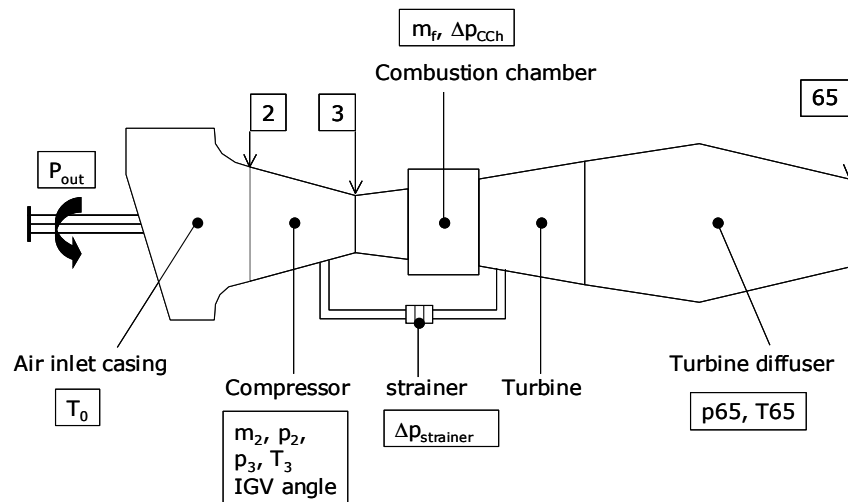
Tabell 1 visar en lista över de valda felen och de gasturbinkomponenter som påverkas, samt de simulerade felnivåerna i procent.

Tabell 1. De studerade felen.

Fel	Beskrivning	K	BK	T	Felnivå (%)
F1	Kompressor försmutsning	X			20, 50, 66, 80, 100
F2	Ökat toppspel i kompressor	X			33, 50, 66, 80, 100
F3	Blockerat brännkammarinlopp		X		25, 50, 66, 80, 100
F4	Membran läckage i brännkammare		X	X	25, 50, 66, 80, 100
F5	Kylluftläckage in i turbinen	X		X	20, 50, 66, 80, 100
F6	Sliten centralhustätning		X	X	25, 50, 66, 80, 100
F7	Erosion i framkanten av ledskena 1			X	25, 50, 66, 80, 100
F8	Blockerad kylluftkanal till steg 1			X	20, 50, 66, 80, 100
F9	Erosion i bakkanten av turbinskovl			X	33, 50, 66, 80, 100
F10	Åldring/ökat toppspel i turbinskovlarna			X	33, 50, 66, 80, 100

Det är också viktigt att påpeka att de parametrar som användes för studien ingår i standardmätssystemet som finns installerade på industriella gasturbiner vid leverans. Indata till ANN-programmet innehåller parametrar som kan kontrolleras antingen av operatören eller reglersystemet (t ex lasten, P_{out} , och max eldnings temperatur, T_{lim}). Detta gör det möjligt att ta

hänsyn även till reglersystemets inverkan på felsekvensen. I figur 8 visas de parametrar som använts i studien (p står för tryck, T för temperatur och m för massflöde).



Figur 8. Parametrar för ANN-feldiagnostik.

ANN tränades med data som motsvarade en frisk gasturbin (felnivå 0 %) samt med data för de tio fullt utvecklade felen (100 % felnivå). Data för andra felnivåer (> 0 % och < 100 %) användes inte under träningen, utan de sparades för att testa den färdiga ANN-modellen.

Resultat från studien visade att ANN kan upptäcka felen i ett tidigt skede, d.v.s. innan de är fullt utvecklade. Det är en av ANN:s egenskaper att känna igen mönster som ligger "tillräckligt nära" det riktiga svaret. Med avsikt att förstärka den här egenskapen har utsignalen från ANN implementerats i en grafisk display som kan tolkas av operatören i kontrollrummet. Den här metoden ökar träffsäkerheten och underlättar upptäckten av de flesta fel vid ett tidigt stadium.

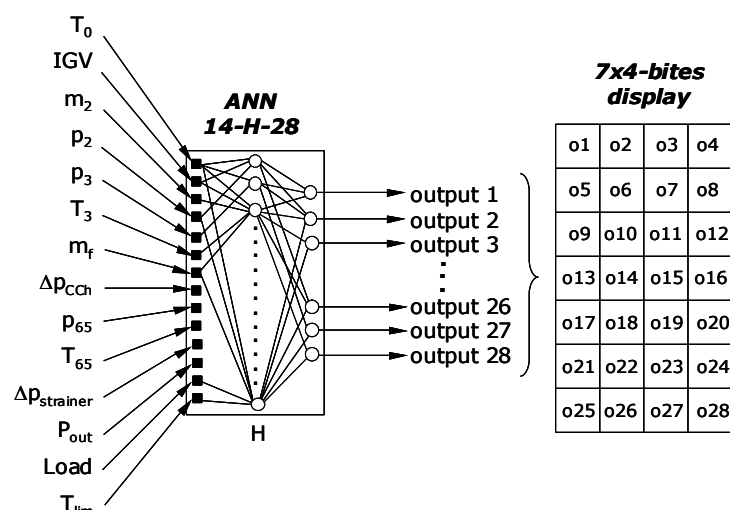
En så kallade framåtkopplad ANN-modell användes i studien med topologin 14-H-28, d. v. s. 14 insignaler, H st dolda neuroner och 28 utsignaler. Det optimala antalet dolda neuroner (H) bestämdes under inlärningsfasen genom en "trial-and-error" procedur. De 28 utsignalerna är binära tal som arrangeras i olika kombinationer i en grafisk display för att generera de önskade signalerna (se figur 9). En etta tolkas i displayen som en svart ruta, medan en nolla omvandlas till en vit ruta.

Under träningen presenteras både anläggningsdata och de korrekta utdata till ANNmodellen (en unik kombination av binära tal som visar gasturbintillståndet i displayen) och på detta sätt lär ANN att kartlägga vilka värden som motsvarar vilka tillstånd. Efter träningen testas ANN genom att ny och för ANN-modellen okänd data presenteras. ANN-modellen bör då vara kapabelt att knyta dessa värden till motsvarande anläggningstillstånd. Eftersom det inte är exakt samma data som presenteras till ANN under träning och test, kommer utsignalerna från ANN under testet inte att vara binära tal, utan reella tal mellan 0 och 1. Följande filter appliceras för att generera en meningsfull signal i det grafiska fönstret:

```

If output > 0.6 then output = "black", else
  If output < 0.4 then output = "white", else
    Output = "gray"

```



Figur 9. ANN för feldiagnostik av industriell GT med grafisk interface (7x4 bitar).

Resultat från studien visar att ett ANN-baserat diagnostiksystem förmår att känna igen de vanliga felen hos industriella gasturbiner som systemet har tränats för. Igenkänningsförmågan hos feldiagnostiksystemet varierar dock för de olika felen, vilket beror på kompensationsförmågan hos turbinens reglersystem som aktiveras då parametervärden avviker från de förväntade.

Ett sätt för att förbättra diagnostiken är att låta en operatör komplettera informationen på den grafiska display som visar utsignalen från ANN-systemet, genom tyda de tecken som visas. Tabell 2 visar systemprestanda utan och med operatörens interaktion. Av tabellen framgår att med operatörens samverkan kan de flesta fel diagnostiseras med högre noggrannhet redan vid felnivå 60 % (med undantag av fel nr. 3 och i mindre utsträckning fel nr. 1).

Felnivåer lägre än 50 % är svåra att detektera då gasturbinens reglesystem kompenserar effektivt för parametrvariationer inom det intervallet.

Tabell 2. Prestanda för ANN-baserat diagnostiksystem utan och med operatörens interaktion.

Felnivå	Prestanda i % utan operatören						Prestanda i % med operatören					
	0%	20-33%	50%	66%	80%	100%	0%	20-33%	50%	66%	80%	100%
H	100	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-
F1	-	0	0	37.5	68.8	100	-	0	12.5	56.3	87.5	100
F2	-	0	25	75	93.8	100	-	6.3	62.5	93.8	100	100
F3	-	0	0	0	6.3	100	-	0	0	0	87.5	100
F4	-	0	0	50	93.8	100	-	0	0	81.3	100	100
F5	-	0	0	62.5	87.5	100	-	0	50	100	100	100
F6	-	0	43.8	68.8	93.8	100	-	0	62.5	93.8	100	100
F7	-	0	0	56.3	87.5	100	-	0	56.3	100	100	100
F8	-	0	0	100	100	100	-	0	81.3	100	100	100
F9	-	0	31.3	68.8	93.8	93.8	-	6.3	50	100	100	100
F10	-	0	12.5	100	100	100	-	6.3	50	100	100	100
Tot.	100	0	11.3	61.9	82.5	99.4	100	1.9	42.5	82.5	97.5	100

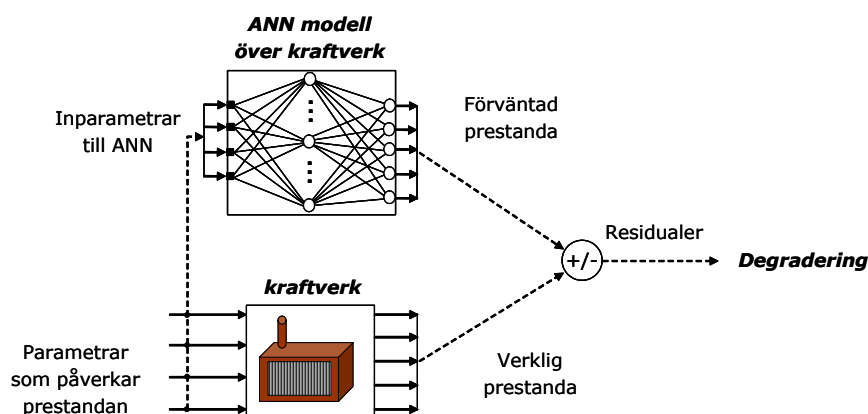
Figur 10 visar resultaten från ANN diagnostik i ett grafiskt gränssnitt där operatören kan upptäcka felet ”nummer 2” redan vid 80 % felnivå (FL = fault level) och felet nr. 5 redan vid 50 % felnivå.

TARGET	ANN-display				
	FL 20-33%	FL 50%	FL 66%	FL 80%	FL 100%
					
Operator interpretation	Healthy engine	Not totally Healthy engine	An as far unknown fault is developing	Fault No. 2	Fault No. 2
					
Operator interpretation	Not totally Healthy engine	Developing Fault seems to be No.5	Fault No. 5	Fault No. 5	Fault No. 5

Figur 10. Exempel på grafisk tolkning av ANN-systemets utsignal.

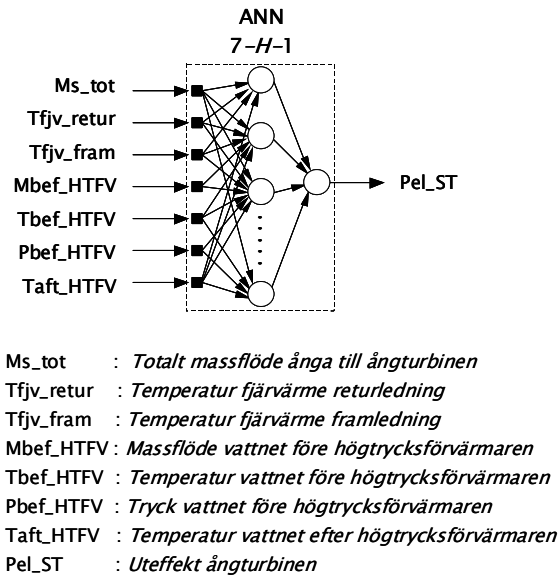
5.4.4. Delprojekt 3: ANN-modellering av VHV:s ångcykeln baserat på verkligt data

Inledande försök med verkliga driftdata från VHV:s ångcykel fokuserades på studier kring ANN:s förmåga att modellera anläggningen och prediktera dess karakteristik. Positiva resultat från denna studie skulle betyda att en sådan modell skulle kunna användas för on-line övervakning och framförallt detektering av långtidsdegraderingen. Principen för detta tillämpningsexempel är att jämföra förväntad anläggningsprestanda (som anges av ANN) med det verkliga utfallet. Skillnaden mellan dessa skulle visa degraderingsgraden och avvikelens storlek möjliggör dess kvatifiering, och därmed tidpunkten för eventuella åtgärder, se figur 11.



Figur 11. Principen för on-line övervakning av långtidsdegradering med ANN.

Enkla ANN-modeller som predikterar den utvecklade eleffekten i ångturbinen har konstruerats i den här förstudien. Detta gav underlag för identifiering av parametrar som är nödvändiga för utveckling av en noggrannare ANN modell, se figur 12.

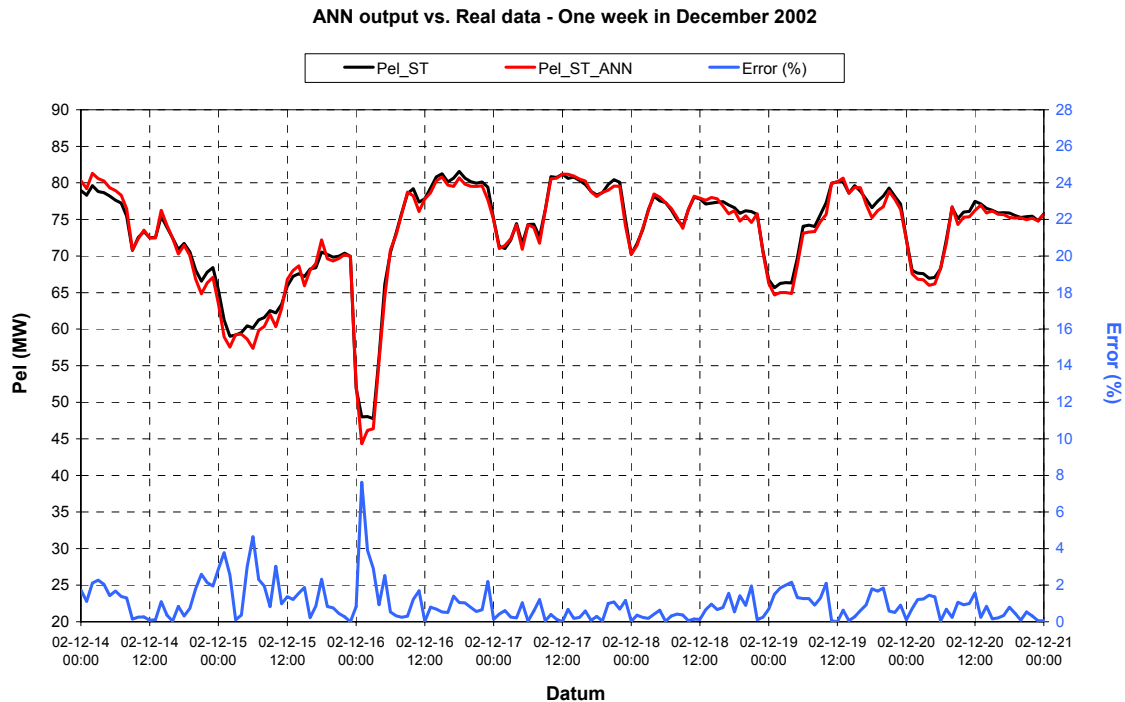


Figur 12. ANN för modellering av ångcykeln i Västhamnsverket.

Mätdata från anläggningen har förbehandlats enligt följande:

- All data med värmepumpen i drift har rensats bort, eftersom anläggningsmodellen innefattar inte värmepumpen.
- Data från transienta driftlägen har tagits bort.

Resultaten, presenterade i figur 13, visar att den producerade eleffekten kunde predikteras med acceptabel noggrannhet. Figuren visar mätdata insamlade under en vecka i december 2002. Den svarta linjen visar det verkliga utfallet och den röda linjen visar ANN:s prediktion. Den blåa linjen (läses av vid den högra axeln) visar felet i %. Som det framgår av figuren ligger felet för det mesta under 2 procent marginalen med enstaka punkter över det. Medelfelet för alla punkter var 1.23 %.



Figur 13. Prediktering av uteffekt i ångturbinen.

Det bör dock påpekas att data som har använts här består av 1-timmes medelvärden för de olika parametrarna. Medelvärdesbildningen försvårar det för ANN att fånga upp snabba förlopp och transienter. Ofta inträffar sådana driftsituationer vid låga laster och därför blir ANN:s noggrannhet sämre just i det lastområdet. Ett sätt för förbättra resultaten är att samla mätdata med tätare samplingsintervall och helst inte medelvärden, utan momentan värden.

5.4.5. Delprojekt 4: Modellering av VHV:s ångcykeln med värmebalansprogrammet IPSEpro

För att kunna utveckla ANN-baserat feldiagnostiksystem för ångcykeln, krävs tillgång till en detaljerad systemmodell, där feldata för träning av ANN-verktyget kan simuleras. Eftersom de traditionella värmebalansprogrammen inte innehåller tillräckligt detaljerade off-designmodeller av ångcykelkomponenterna, har komponentmodeller för ändamålet utvecklats inom ett examensarbete på inst. för Värme- och Kraftteknik. Komponentmodellerna som utvecklades av Markus Truedsson i form av examensarbete (20p) med Magnus Genrup som handledare implementerades i det kommersiella värmebalansprogrammet IPSEpro [16, 21]. Modellerna har kalibrerats mot garantiprovet utförda vid kundövertagandet av kombianläggningen. Den färdiga modellen jämfördes med övriga lastfall under provet och visade mycket god överensstämmelse.

Efter att ett antal vanligt förekommande fel på ångcykler hade definierats, användes modellen för generering av feldata för att träna ANN-modellen. En detaljerad beskrivning av ångcykelmodellen återfinns i bilaga 1.

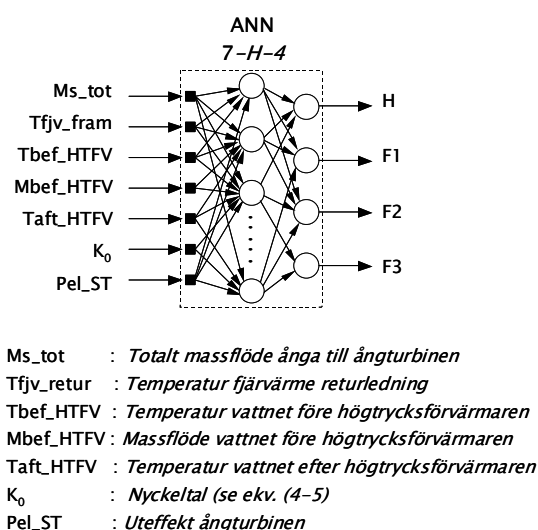
5.4.6. Delprojekt 5: ANN-baserad feldiagnostik av VHV:s ångcykeln

Samma metodik som beskrevs i avsnitt 4.4.3 användes i detta delprojekt, men anpassat till ångcykeln. Då det saknades verklig data vid olika fel på anläggningen, simulerade feldata med hjälp av den ångcykelmodell som beskrevs i förgående avsnitt. Följande tillstånd simulerades för VHV:s ångcykel:

- Ett s.k. ”friskt” tillstånd (anläggningen fungerar korrekt)
- Fel 1: Erosionsskador i reglersteget (båge tre och fyra kraftigt eroderat)
- Fel 2: Beläggning i första delturbinen
- Fel 3: Skadad gaveltätning (högtryckssidan)

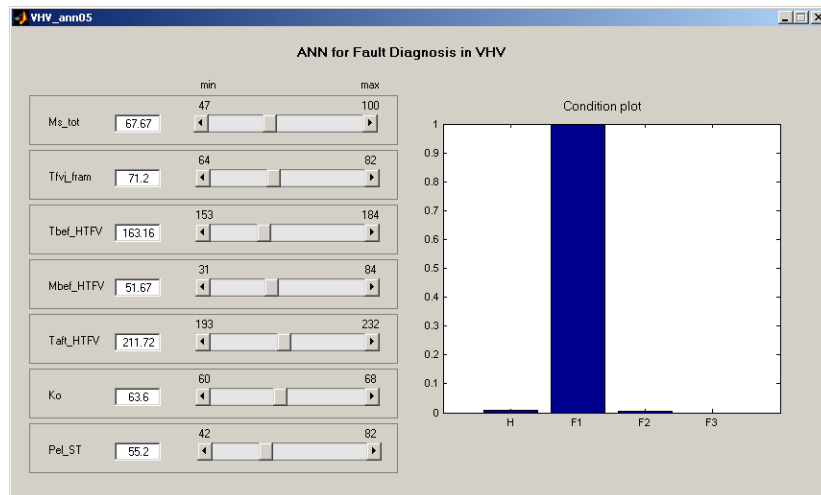
Tillstånden ovan simulerades vid olika laster och resulterade i en datamängd innehållande mer än 1000 driftpunkter.

Flera ANN-modeller av den typ som visas i figur 14 tränades för feldiagnostik och ett flertal alternativa approach testades. Det räckte med 60 % av de tillgängliga data för att träna nätverket, medan 15 % användes för kontroll och validering, och resterande 25 % av datamängden användes för att testa de färdigtränade ANN-modellerna. Den bästa ANN-modellen visades vara kapabelt att känna igen tillstånden i så gott som alla driftpunkter med en träffsäkerhet på 99.9 %.

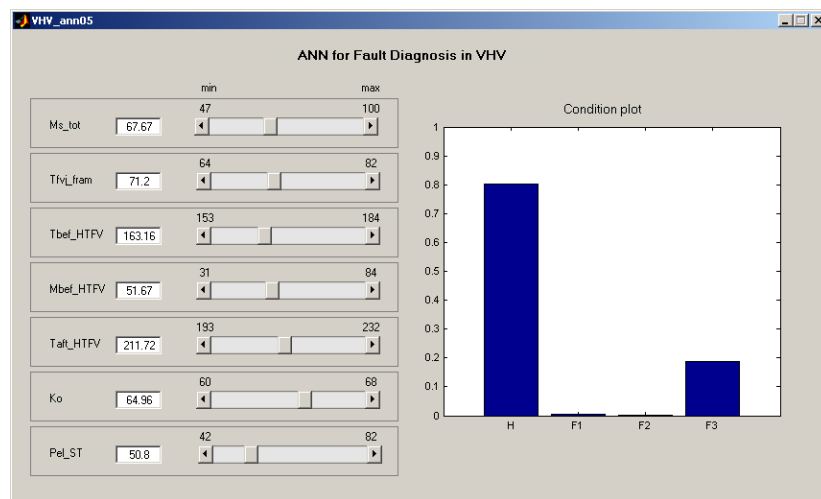


Figur 14. ANN för feldiagnostik på VHV:s ångcykeln.

Dessutom, för att förbättra samspelet mellan operatören och ANN-verktyget, har ett gränssnitt utvecklats i programmeringsmiljön MatlabTM, där operatören matar in värdena för det aktuella drifttillståndet ”för hand” (antingen genom att skriva in dem i fönstren till vänster eller ställa in dem med slider-knapparna i mitten). Grafen som visar ångcykelns tillstånd (till höger) bildas i real tid och visar anläggningens kondition för den givna kombinationen av indata. I exemplet i figur 15 säger ANN-verktyget att fel nr. 2 inträffar i ångcykeln. I det exempel som visas i figur 16 är fel nr. 3 under utveckling.



Figur 15. ANN-baserat feldiagnostik på ångcykeln m.h.a. grafisk interface.



Figur 16. Fel nummer 3 håller på att utvecklas.

Nästa steg i studien är att utvärdera feldiagnostikmodellen med verklig data från VHV och sedan implementera den i anläggningen. Detta ställer dock högre krav på mätningarna:

- Samplingstiderna bör minskas så att de passar felsekvensernas tidskonstanter.
- Sensorvalidering bör också implementeras för att försäkra sig om att det är anläggningen och inte mätsonderna som är fel på.
- Identifiering av fel och instruktioner för nödvändiga åtgärder bör tas fram i samarbete med experter på anläggningen.
- Beroende på mätinstrumentens noggrannhet, bör någon slags brusfiltrering användas.
- Fall med multipla fel bör analyseras separat.

5.4.7. Resultat från modellering och diagnostikstudier

Projektgruppens arbete har resulterat i utveckling av konkreta verktyg för specifika tillämpningar, inhämtning och uppdatering av kunskaper inom modellering och diagnostikområdet, samt kartläggning av viktiga erfarenheter från andra tillämpningar. Vidare har forskargruppen meriterat sig genom publicering på såväl nationell som internationell nivå.

De verktyg som har utvecklats inom projektet med tillfredställande resultat är:

- Ett ANN-verktyg för simulering och feldiagnostik av GTX100, baserad på simulerade data.
- En validerad fysikalisk modell av VHV:s ångcykeln för parameter- & konceptstudier.
- Ett ANN-verktyg för feldiagnostik av VHV:s ångcykel, baserad på simulerade data.
- Ett ANN-verktyg för on-line övervakning, kartläggning av degradering och parameterstudier av VHV:s ångcykel.
- En generisk fysikalisk modell för gasturbiner

Vidare har insatser gjorts för att utveckla grafiska användargränssnitt för att underlätta samspelet mellan operatören och ANN-verktygen.

Bland de kunskaper och erfarenheter som projektgruppen har skaffat räknas den omfattande litteraturstudien och utvärderingen av kommersiella datorprogram för ANN beräkningar. Utvärderingen resulterade i anskaffning av ett kommersiellt program, Neuro SolutionsTM, som kompletterar datorprogrammet MatlabTM som användes för utveckling av egna ANN program.

5.4.8. Arbetets nyhetsvärde

ANN-tekniken har haft en stark utveckling under de senaste tio åren och har tillämpats på många olika områden. Projektets nyhetsvärde ligger i integrering av ANN-tekniken med energiapplikationer. I detta projekt har fokus legat på utvecklingen av ANN-verktyg för praktisk användning i kraftverksanläggningar. Ytterligare exempel på tillämpningar av ANN-tekniken i energisammanhang som institutionen för Värme- och Kraftteknik har jobbat med är presenterade i referenserna 5, 6, 11, 12, 13, 14 och 15 som bl.a. omfattar:

- Korrektionsförfarande för gasturbiner och evaporativa cykler
- Online sensor validering och feldiagnostik för termiska kraftverk
- Feldiagnostik för en dieselmotor
- Fjärrövervakning av termiska kraftverk

5.4.9. Förslag på fortsatt arbete

Forsrkargruppen har sammanställt följande förslag på förbättringar och fortsatt arbete:

- Uppdatera ANN-verktyget för VHV:s ångcykel genom träning med momentan data med kortare samplingsintervall.
- Utöka ANN-verktyget för ångcykeln till att omfatta andra intressanta parametrar.
- Undersöka hur ANN-modellen för GTX100 svarar mot verklig data
- Framtagning av nyckeltal för konditionsbestämning (ångcykel).
- Införa nya/bättre mätningar. Speciellt följande parametrar är intressanta: reglerstegstrycket, trycket i värmekondensorerna, trycket i högtrycksavtappningen, ventillägen för ångturbinen & spärrånga.
- Identifiera eventuella synergieffekter som kan uppnås när ANN och CMS verktygen kombineras för uppföljning av gasturbinen. Avsikten är att identifiera de tillämpningsområden där kombinationen av ANN och CMS ger säkrare övervakning och diagnostik.

6. Validering av modell för beräkning av kylda gasturbiner

6.1. Bakgrund

Många termodynamiska studier görs ständigt runtom i världen för att beskriva och utvärdera olika gasturbinbaserade kraftverkskoncept. En stor del av dessa studerade cykler använder alternativa arbetsmedier (t.ex. fuktig luft eller koldioxid) och/eller alternativa kylmedier för skovelkylning (t.ex. ånga, fuktig luft eller koldioxid). Det är därför i detta sammanhang viktigt att kunna ta hänsyn till den inverkan som t.ex. kylningen av gasturbinens skovlar har på processverkningsgraden, och i förlängningen även på en tänkt anläggnings ekonomi och livslängd.

Vid institutionen för Värme- och Kraftteknik pågår sedan några år tillbaka arbete med att ta fram en enkel, hanterbar och tillförlitlig modell för termodynamiska beräkningar av kylda gasturbiner. Modellen är validerad mot data tillgängliga i den öppna litteraturen, något som bara kan ge grova, men hittills med studerade data väl överensstämmande, resultat rörande modellens förmåga att beskriva expansionen i en kyld gasturbin.

6.2. Kylmodell matchad mot data för GTX100

Att validera modellen mot data från GTX100 i Helsingborg har inneburit en unik möjlighet att utvärdera modellens egenskaper och utöka kunskapen om ingående modellparametrar. Detta kommer i sin tur att leda till ökad tillförlitlighet i framtida studier av gasturbincykler, vilket anses vara en ovedersäglig fördel jämfört med de allra flesta andra akademiska studier av samma art, där brister i kunskaper rörande prestanda hos verkliga gasturbiner ofta förekommer.

6.3. Projektstatus

Mätdata från ett fullastfall för GTX100 i Helsingborg erhöles från Siemens. Dels har temperaturmätningar från ett stort antal punkter på bl.a. skovlar och diskar i turbinen erhållits, dels har massflöden och temperaturer på kylflöden och varma gaser erhållits. Detta har inneburit att funktionen av kylmodellen har kunnat demonstreras, dvs. det var möjligt att demonstrera att syftet med en kylmodell är just att uppskatta kylmediets massflöde, medan expansionsmodellen uppskattar hur kylningen påverkar effektuttaget från turbinen.

Då fullständiga mass- och värmebalanser, samt ett stort antal ytemperaturer var tillgängliga för första ledskenan för GTX100, var det möjligt att utvärdera mer i detalj kylmodellens beteende. Det är möjligt att uppfylla samma mass- och energibalans med olika kombinationer av indata i modellen, men tack vare kända data var det möjligt att fastställa vad som är lämpliga indata, något som också borde betyda säkrare användning av modellen i framtiden.

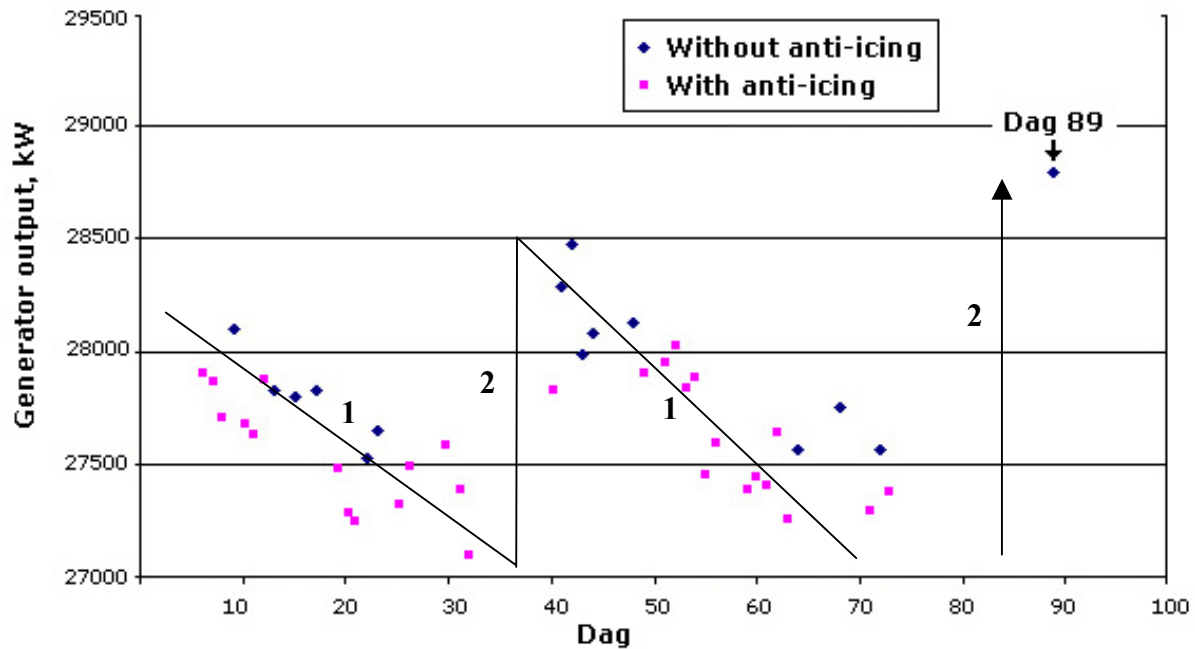
Även en fullständig modellering av GTX100 gjordes i värmebalansprogrammet IPSEpro. P.g.a. de stora mängderna indata var denna modellering mycket enkel att göra, och gav värdefulla kunskaper för den referensgasturbin (RefGT) som användes för de termodynamiska cykelstudierna i avhandlingen. Indata för RefGT är inte identiska med indata för modellen av GTX100, men inte desto mindre har erfarenheterna från modelleringen av GTX100 ökat tillförlitligheten på resultaten från de termodynamiska studierna.

Resultat från dessa studier presenteras i Jordals doktorsavhandling [9], där modellbeskrivning, validering och tillämpningar ingår.

7. Kompressortvätt

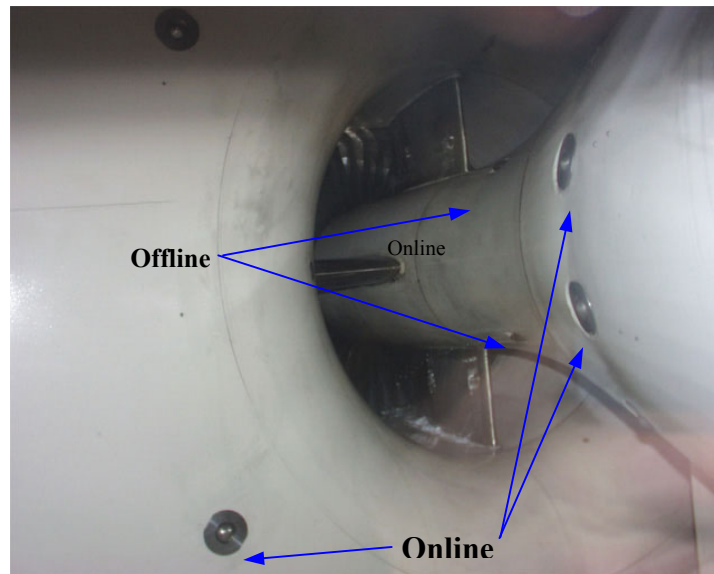
7.1. Bakgrund

Gasturbiner utsätts för luftburna föroreningar under drift, t.ex. salter, organiska föreningar och sot. Dessa avlagras på kompressorskovlarna och främst på de främre stegen. Detta orsakar en försämring av aerodynamiken i kompressorn, med försämrade prestanda och ökad risk för instabil drift som följd. Försmutsningen ökar även risken för skovelkorrosion och igensättning av gasturbinens avancerade kylsystem. Genom att regelbundet tvätta kompressorn kan gasturbinens prestanda nästan helt återställas, se figur 17.



Figur 17. Generator effekt för en gasturbin som funktion av tiden vid degradering (1) och tvättning (2).

En kompressortvätt brukar vanligtvis utföras med hjälp av spraymunstycken i kompressinloppet. Tvättningen sker antingen Online eller Offline. En gasturbin kan vara utrustad för båda procedurerna, se figur 18. En Onlinetvätt innebär att maskinen är i drift och att endast vatten används för att rengöra kompressorn. Kompressortvätt under pågående drift, d.v.s. on-line tvätt, ökar risken för transport av föroreningar längre in i maskinen där kylda komponenter som brännkammare och expandern finns. On-line tvätt kan därför leda till igensättning av känsliga kylkanaler med komponenthaverier som följd. En fördel med on-line tvätt är att maskinen inte behöver stoppas och därmed går inte dyrbar produktionstid förlorad.



Figur 18. Placering av tvättmunstycken på insidan av kompressorinloppet till Alstoms Power's GT 10.

En off-line tvätt innebär att kompressorn tvättas då maskinen inte är i drift. Rotorn "baxas" då runt vid låga varvtal med hjälp av startmotorn. I detta fall används både tvättmedel och vatten för att rengöra kompressorn, se figur 19. Dränaget från tvättningen avtappas på flera ställen runt maskinen för att undvika igensättning av kylkanalerna. För att avgöra om kompressorn har blivit ren vid en off-line tvätt mäter man konduktiviteten på dränaget och jämför detta med rent vatten samt en visuell kontroll av kompressorn genomförs med hjälp av ett boroskop.



Figur19. Offlinetvätt.

Den litteratur som behandlar kompressortvätt är till stor del baserad på kunskap och erfarenheter från praktiska försök. I takt med att datorernas prestanda har ökat dramatiskt under 1990-talet, har det blivit möjligt att med CFD (Computational Fluid Dynamics) studera 3-dimensionella strömningsfält i både en och två faser (t.ex. luft och vatten) i industriella tillämpningar. Detta görs lämpligast i kommersiella CFD-beräkningsprogram (t.ex. Star-Cd). Denna teknik har aldrig tidigare prövats i kompressortvättsammanhang.

7.2. Arbetsmetodik

Arbetet är fokuserat på att undersöka moderna fluidmekaniska verktygs möjligheter för analys av kompressortvätt. Både experimentella (Laserbaserade) och beräkningsmässiga (CFD) metoder har använts. Metoderna är nya i denna fysikaliskt mycket krävande applikation och arbetet har kantats av en hel del arbete av "trial and error" karaktär.

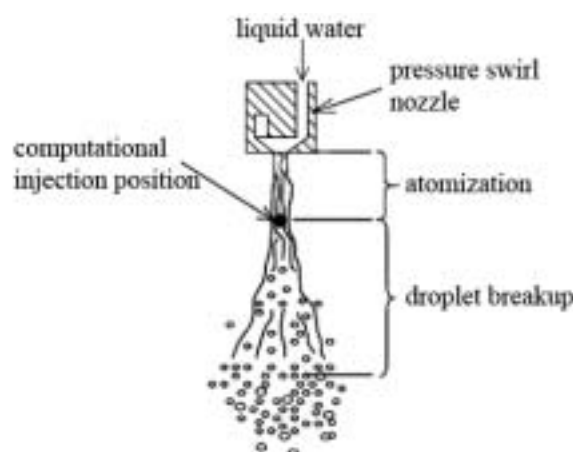
Beräkningarna syftar till att undersöka om tvättproceduren kan förbättras, genom att detaljstudera tvättmunstyckenas placering och funktion. En spin-off effekt är att undersöka om CFD är ett lämpligt verktyg att studera problem av den här typen.

En annan viktig fråga förknippad med off-line tvätt är kopplad till uppvärmning av tvättvätskan. Uppvärmning av vätskan leder vanligen till minskning av droppstorleken och förväntas också minska termiska spänningar i skovlarna under tvätten. Men uppvärmningen är både tidskrävande och leder till begränsning av den tillgängliga vätskemängden. Genom att beräkna väsketemperaturen, då dropparna träffar kompressorskovlarna i CFD-modellen ville man besvara frågan om uppvärmningen hade någon nämnvärd effekt på tvättresultatet.

Spray beräkningar är känsliga för randvillkor. Gasfas randvillkor så som inloppshastighet, turbulensegenskaper m.m., kan gissas med hög trovärdighet då sprayen sitter i en kontraktion och kontraktioner är väl beskrivna i litteraturen. Sprayen (vätskefasen) däremot måste antingen hanteras med grova ingenjörsmässiga metoder eller mätas. Ett av målen har varit att få information om hur känslig beräkningarna är för beskrivning av sprayen och vilka storheter som bör mätas.

Tänkbara mätningar sträcker sig från enkla mått som spray vinkel vid munstycket och genomsnittlig droppstorlek efter avslutad droppbildning (före eventuell förångning) till rumsligt upplösta hastighets och droppstorleksfördelningar. Komplexiteten i mätningarna (och mängden information som skall hanteras) sträcker sig därför över ett stort område.

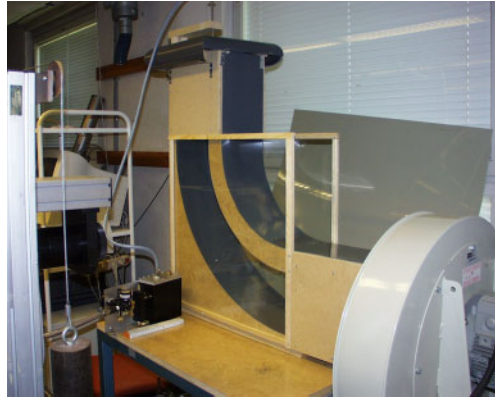
Flera experimentella försök av generisk typ har genomförts för att utvärdera både sprayers egenskaper och de experimentella teknikernas applicerbarhet.



Figur 20. schematisk bild över dropp bildning i en spray.

7.3. Status

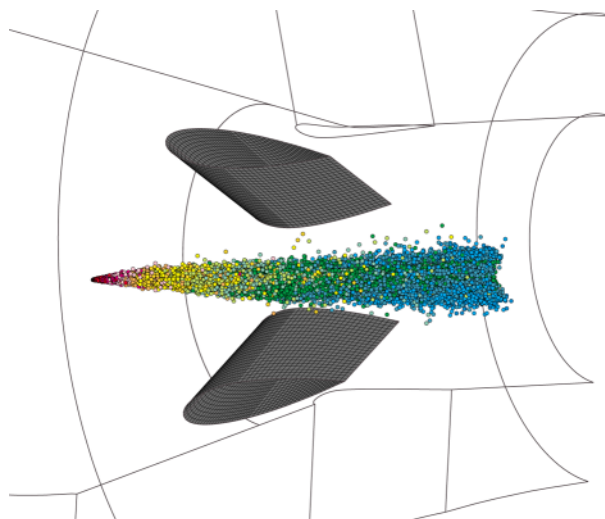
Fältstudier i kompressortvätt har genomförts på både en GT10 i Mariager och på GTX100 i Helsingborg, [10,49]. Omfattande arbete har lagts ner på att utvärdera mätmetoder för sprayer [17, 18]. Mätningar av ett munstycke motsvarande det som används i Helsingborgsmaskinen har genomförts för att tillhandahålla randvillkor för modelleringen.



Figur 21. Mätning av spray i krökt kanal, från [18].

CFD räkningars känslighet för randvillkor har undersökts i ett separat arbete [19]. Även numeriska aspekter av räkningarna har beaktats. Inloppsgeometrin för GTX100 som tillhandahållits av Siemens har använts för modellering av kompressorinloppet. Geometrin har implementerats i CFD-programmet Star-Cd och meshats inför beräkningen. Resultaten har jämförts kvalitativt med direktfotografier av off-line tvätt. De tidigare uppmätta spraydata har använts som randvillkor. Kvalitativ överensstämmelse m.a.p. träffbild och spridning erhöles.

Beträffande inverkan av vätsketemperaturen under tvättprocessen har resultaten av dessa räkningar presenterats i ett uppmärksammat paper [20] som även rekommenderats och accepterats till publikation i Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Den huvudsakliga slutsatsen är att dropparna kyls ner till luftens temperatur innan de träffar IGV, se figur nedan



Figur 22. Beräkning av sprayen i kompressorinloppet från strax efter munstycket till strax före IGV. Färgen markerar dropparnas temperatur.

En mätkampanj som syftar till att korrelera spray-karakteristik mot förmåga att avlägsna smuts från ytor, ”tvätteffekt”, har också genomförts i form av examensarbete. Vidare genomfördes beräkning av dropparnas förmåga att följa sprayen i en luftström med kraftig acceleration. Syftet med denna studie var att få information om lämplig spraykarakteristik för kompressortvätt.

7.4. Arbetsgrupp

Arbetsgruppen bestod ursprungligen av Ulf Engdar (doktorand), Fredrik Hermann (doktorand) och Jens Klingmann (handledare). I den senare fasen har Raik Orbay (doktorand) ersatt Fredrik Hermann.

Bilaga 1

Ångcykelmodellering

I ett traditionellt värmebalansprogram modelleras en ångcykel med enkla modeller. Dessa program har under de senaste 20 åren utvecklats mot bättre användargränssnitt och funktionalitet. Modellerna som används för att beskriva en komponents godhet är till exempel verkningsgrad, gerädigkeits och tryckfall. Med denna typ av modell användes alltid totaltillstånd, då impuls/hastighet saknas i noderna. För att kunna studera en ånganläggnings egenskaper i "off-design", måste dessa anpassas så att man ger antingen geometriska parametrar och verkningsgradsfunktioner eller beräknar dessa från geometrin och hastighetstrianglarna. I projektet användes båda typerna av metoder: den förstnämnda är utvecklad i IPSEpro (ett kommersiellt värmebalansprogram) och den sistnämnda är utvecklad i Siemens program för mittnittsmodeller (som är tillgängligt för institutionen för värme och kraftteknik under projektets gång). Modellerna i IPSE är utvecklade av Markus Truedsson i form av examensarbete (20p) och Magnus Genrup som handledde och utvecklade metoderna. Modellerna är kalibrerade mot garantiprovet som utfördes vid kundövertagandet av kombianläggningen. Den färdiga modellen jämfördes med övriga lastfall under provet och visade mycket god överensstämmelse.

Det som gör off-design beräkning snårig är att man måste koppla tryck – flöde – volymitet, för att kunna definiera tryck i nodpunkterna. Detta ger att man kan lösa resterande termodynamiska storheter om till exempel entropin är känd. Traditionellt använder man modeller som baseras på Stodolas ångkon. Dessa har emellertid svagheten att korrekt beskriva beteendet för hårt lastat och chokat enkelsteg. I detta arbete valdes istället Beckmanns modell som avsevärt förbättrar chokningsbeteendet.

Programmet IPSEpro använder en matrislösare istället för sekventiell ekvationslösning som resulterar i ökad hastighet vid rekursiv beräkning. Dessa lösare bildar normalt en s k Jakobi-matris som innehåller de partiella derivator som behövs för att driva avvikelserna mot noll. Oavsett om Stodolas ångkon eller mer avancerade modeller används kommer derivatan (flöde – tryckförhållande) bli singular när tryckförhållandet går mot ett².

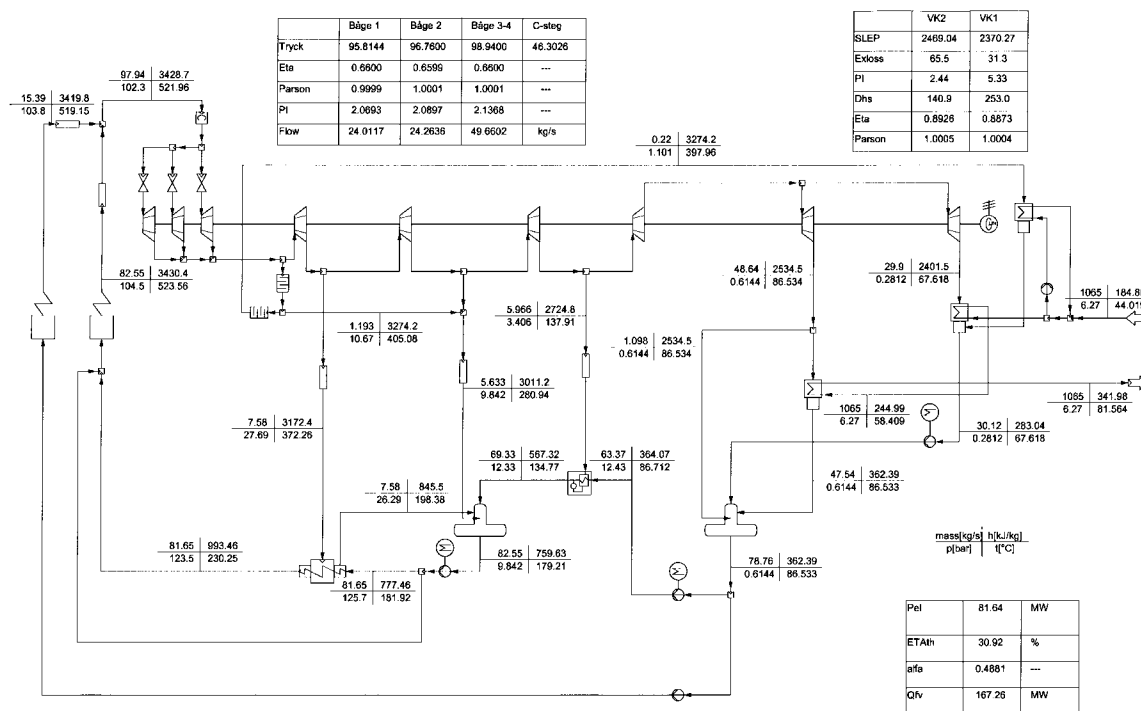
$$\dot{m} \propto \sqrt{1 - \frac{1}{\pi^2}} \rightarrow \frac{d\dot{m}}{d\pi} \propto \frac{1}{\pi^2 \sqrt{\pi^2 - 1}} \quad (4-1)$$

Istället för att som i mittnittsmodellen använda en förlustmodell, används en betydligt enklare korrelation för steglaster. Man kan visa att man till en första ordnings noggrannhet kan korrelera isentropisk verkningsgrad mot det s k Parson-talet. Detta definieras som:

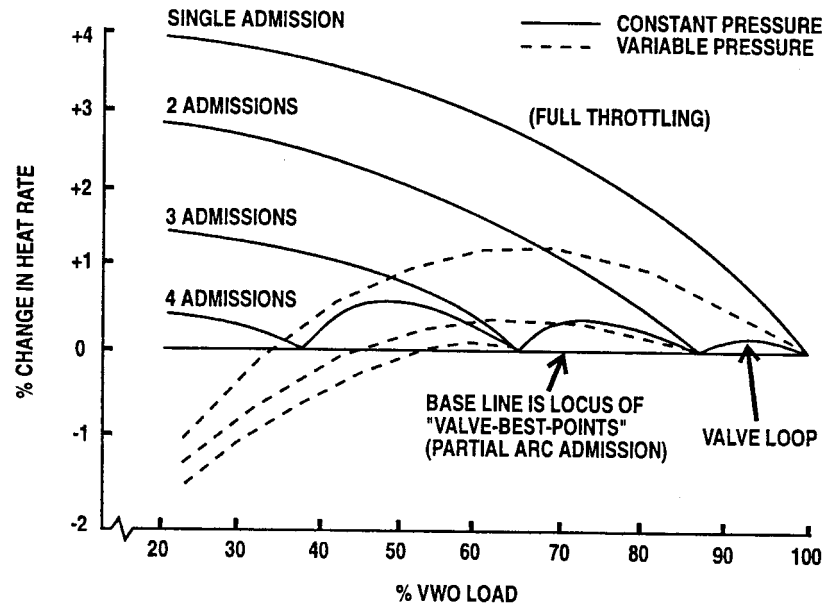
$$X = \frac{\sum u^2}{\Delta h_s} \quad (4-2)$$

Eftersom turbinen är fasad mot elnätet kommer varvtalet ur praktisk betydelse att vara konstant. Enklare är att korrelera verkningsgraden mot relativt Parson-tal och på så sätt försvinner varvtalsberoendet och man kan korrelera mot vanliga nodd-data. Verkningsgradfunktionen följer i princip en parabel men kan skilja avsevärt vid höga Mach-tal då stötförlusterna kan vara fem gånger större än den vanliga profolförlusten.

² Sker t ex när en pådragsbåge stängs



- Undersöka hur man kan optimera sin reglering främst kring området med halva fullastflödet. Vanligt med sk hybridreglering för att undvika stora Mach-tals effekter i reglersteget.
- Utbilda driftpersonal på "sin" anläggning.



Figur 24. Exempel på en ångcykels dellastprestanda vid olika lasfall (Cotton).

Modellen har också använts för att studera hur ett nyckeltal för relationen mellan vissa strategiska parametrar som: flöde – tryck – effekt. En gammal "favorit" är att basera ett nyckeltal på Willian's lag:

$$P_{EL} = \eta_{mech} \cdot \eta_{gen} \cdot \dot{m}_{ADM} \left\{ \eta_{T-T}^I \Delta h_{o,s}^I + (1 - \alpha_1) \eta_{T-T}^{II} \Delta h_{o,s}^{II} + (1 - \alpha_1 - \alpha_2) \eta_{T-T}^{III} \Delta h_{o,s}^{III} + \dots + \left(1 - \sum_{j=1}^{m-1} \alpha_j \right) \eta_{T-S}^M \Delta h_{o,s}^M \right\} \quad (4-3)$$

Om man antar att verkningsgraderna för delturbinerna är konstanta, vilket i och för sig inte är fallet för reglersteget och de sista stegen, erhåller man en linjär funktion:

$$P_{EL} \approx \text{konstant} \cdot \dot{m}_{ADM} \quad (4-4)$$

Man kan relativt enkelt visa att trycket i ett steg är mer eller mindre proportionellt mot flödet (upphöjt till 1.11) och man kan då hitta följande samband:

$$K_0 = \frac{P_{EL}}{p_{stg-n} \cdot \sqrt{T_{adm}}} \quad (4-5)$$

Detta nyckeltal speglar egentligen hur mycket ånga som passerar ett turbinsteg för en viss effekt. Skulle verkningsgraden sjunka måste flödet (och trycket) ökas för att erhålla samma effekt. I det fallet man har beläggning i nerströms turbindel kommer också trycket att öka. Oavsett om verkningsgraden sjunker eller om man har beläggning i nedströms delturbin kommer detta nyckeltal att sjunka. I nämnaren finns en korrektion för admissionstemperaturen, så uttrycket är gångbart även vid drift med avvikande ångtemperatur. Mer information om detta finns i ref [16].

Referenslista

1. Olausson P., Arriagada J.; "General Overview of the Artificial Neural Network Engineering for Energy System Applications", ISRN/LUTMDN/TMVK-3193-SE, Värme- och Kraftteknik, Lund, 2000.
2. Arriagada, J.; "Introduction of Intelligent Tools for Gas Turbine Based, Small-Scale Cogeneration". Licentiatavhandling. ISRN LUTMDN/TMVK--99/7053--SE. Värme- och Kraftteknik, Lund, 2001.
3. Olausson, P.; "Tools for Environmental Design and Operation of Heat and Power Plants". Licentiatavhandling. ISRN LUTMDN/TMVK--99/7052--SE. Värme- och Kraftteknik, Lund, 2001.
4. Arriagada J., Genrup M, Loberg A. and Assadi M.; "Fault Diagnosis System for an Industrial Gas Turbine by Means of Neural Networks". IGTC2003Tokyo TS-001. International Gas Turbine Congress 2003 - Tokyo, Japan, November 2003.
5. Mesbahi E., Genrup M. and Assadi M.; "Fault prediction/diagnosis and sensor validation technique for a steam power plant". Submitted for publishing in "ENERGY-The International Journal".
6. Mesbahi, E., Arriagada, J., Assadi, M., Ghorban, H: "Diesel Engine Fault Diagnosis by Means of ANNs: A Comparison Between Fault Pattern and Residual Method". Submitted to Journal of Marine Design and Operations. UK, Newcastle, 2003.
7. Cabrejas P.; "Artificial Neural Networks: A Novel Tool for Analyze and Control of Modern Energy Systems", ISRN/LUTMDN/TMVK—5345—SE, Lund, 2001.
8. Olausson P., Arriagada J.; "Case study for evaluation of an ANN-model generated in Matlab Neural Toolbox, applied to GTX100", Lund, 2001.
9. Jordal K., 2001, "Modeling and Performance of Gas Turbine Cycles with Various Means of Blade Cooling", Doctoral Thesis, Department of Heat and Power Engineering, Lund University, ISRN LUTMDN/TMVK—1027—SE.
10. Engdar U., Genrup M., Hermann F.; "Compressor Washing Off-Line", Dept. of Heat and Power Engineering, Lund, 2000.
11. Assadi, M, Mesbahi, E., Torisson, T., Lindquist, T., Arriagada, J., Olausson, P., "A Novel Correction Technique for Simple Gas Turbine Parameters". ASME TURBOEXPO 2001, New Orleans, USA. Paper No 2001-GT-0009.
12. Mesbahi, E., Assadi, M., Torisson, T., Lindquist, T., "A Unique Correction Technique for Evaporative Gas Turbine (EvGT) Parameters". ASME TURBOEXPO 2001, New Orleans, USA. Paper No 2001-GT-0008.
13. Mesbahi E., Assadi M., Torisson T.; "An online and Remote Sensor Validation and Condition Monitoring System for Power Plants", accepted at CIMAC 2001, Germany.
14. Olausson, P.; "On the Selection of Methods and Tools for Analysis of Heat and Power Plants". Doktorsavhandling. ISRN LUTMDN/TMHP--03/1014--SE. ISBN:91-628-5844-0. Värme- och Kraftteknik, LTH, Lund, 2003.
15. Arriagada, J.; "On the Analysis and Fault-Diagnosis Tools for Small-Scale Heat and Power Plants". Doktorsavhandling. ISRN LUTMDN/TMHP--03/2115—SE. ISBN: 91-628-5843-2. Värme- och Kraftteknik, LTH, Lund, 2003.

16. Genrup, M.; "Theory for Turbomachinery Degradation and Monitoring Tools". Licentiatavhandling. ISRN LUTMDN/TMHP--03/7014--SE. Värme- och Kraftteknik, Lund, 2003.
17. E. Marin-Lamellet "Fluid Dynamic Computations of a Liquid Jet in a Cross-Flow of Air", LUTMDN/TMHP -- 02/3003 -- SE, 2002.
18. Petter Johansson, "Experimental Study of Water Droplets and Air in a Simplified Compressor Inlet to a Gas Turbine under Off-Line Washing Conditions", Master Thesis, Dept. of Heat and Power Engineering, Lund, 2001.
19. R. C. Orbay, "Investigation of a Water Spray, Part 1- Laser Diagnostics", Internal report, Dept. of Heat and Power Engineering, 2004.
20. U. Engdar, R.C. Orbay, M. Genrup, and J. Klingmann, "Investigation of the Two-Phase Flow Field of the GTX100 Compressor Inlet during Off-Line Washing", ASME GT2004-53141, 2004.
21. Truedsson, M., "Systemstudie av Västhamnsverket i Helsingborg". Examensarbete, Institutionen för Värme- och Kraftteknik, LTH. ISRN LUTMDN/TMHP-04/5051-SE, ISSN 0282-1990, Lund, 2004.
22. RT T10C 63/01, GTX100, Prototype test report, Engine B520 Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
23. RT T10C 68/02, GTX100, B520 Helsingborg - Test report summer 2002, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
24. RT T10C 60/01, Summary of performance of engine B520 in Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
25. RT LXP 8/02, Prestandaprov på anläggning B687, GTX100 B520 samt den uppgraderade ångturbinen B3504, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
26. RT GPXP 03/2004, Prestandaprov av anläggning B0687, GTX100 B0520 samt den uppgraderade ångturbinen B03504, i Västhamnsverket, Helsingborg, Demag Delaval Industrial Turbomachinery, 2004
27. RT GPXP 16/2004, GTX 100 Helsingborg – Prestandabedömning oktober 2004, Siemens Industrial Turbomachinery, 2004
28. RT SP 13/00, RT SP 13/00 - B0520 Helsingborg Inspektion i verkstaden i Finspång, ALSTOM Power Sweden AB, 2000
29. RT SP 12/01, RT SP 12/01. Inspektion av spridare, B520 Helsingborg, brännarsats B523. ALSTOM Power Sweden AB, 2001
30. RT SP 33/01, RT SP 33/01 - B000520 Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
31. RT LFA 42/01, Inspektions rapport av B000520 Helsingborg, GTX 100-A, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
32. RT SP 98/01, Inspektions rapport av B000520 Helsingborg, GTX 100-A i Alstom's verkstad , ALSTOM Power Sweden AB, 2001
33. RT SP 125/01, Inspektion av GTX 100 spridare, Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2001
34. RT SP 78/02, RT SP 78/02. Inspection report GTX100-A, B000520 Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
35. RT SP 106/02, Inspektions rapport av B520 Helsingborg, GTX 100-A, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
36. ICS30893, GTX100 Level-A inspection report. B000520 Helsingborg, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
37. RT SX 134/03, Inspektions rapport B0520 Helsingborg av turbinmodul efter kristallprov, ALSTOM Power Sweden, 2003

38. 1CS35304, B000520 Helsingborg. Boroskopinspektion i samband med testkörningar, ALSTOM Power Sweden, 2003
39. RT SX 15/03, Inspection report GTX100-A B000520 Helsingborg, ALSTOM Power Sweden, 2003
40. RT SOB 11/3, Inspection report, Helsingborg B000520, GTX 100, Demag Delaval Industrial Turbomachinery, 2003
41. 1CS38165, Analys av partiklar från B520 Helsingborg. Demag Delaval Industrial Turbomachinery, 2003
42. 1CS43498, Extended level-A inspection, commissioning report, GTX100, B000520 Demag Delaval Industrial Turbomachinery, 2003
43. RT SOB 22/03. Inspection report after burner tests B000520 Helsingborg GTX100-A dual fuel, Demag Delaval Industrial Turbomachinery, 2003
44. 1CS 6 243, Kravspecifikation Condition Monitoring System (CMS), Service ALSTOM Power Sweden AB, 1998
45. 1CS10983, Condition monitoring system – CMS, ALSTOM Power Sweden AB, 1999
46. 1CS14625, Specifikation CMS GTX100 modul 1 (prestanda) ALSTOM Power Sweden AB, 2000
47. RT RT 2/02, Specifikation of ECMS for CMS, ALSTOM Power Sweden AB, 2002
48. RT RDV 48/02, Förstudieresultat CMS Modul 3 "Basic", ALSTOM Power Sweden AB, 2002
49. RT RGP 14/02, Provs av kompressortvätt GTX100, ALSTOM Power Sweden AB, 2002



Hemsida www.sgc.se • epost info@sgc.se
