
Rapport SGC 183

Tillståndsovervakning och termoeconomisk driftoptimering av en hybridanläggning med artificiella neurala nätverk

©Svenskt Gastekniskt Center – Maj 2008

Mohsen Assadi & Magnus Fast
INSTITUTIONEN FÖR ENERGIVETENSKAPER
LUNDS TEKNISKA HÖGSKOLA

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, E.ON Gas Sverige AB, E.ON Sverige AB, Lunds Energikoncernen AB (publ), Göteborg Energi AB, och Öresundskraft AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Energimyndigheten
Värmeforsk AB
Siemens Industrial Turbomachinery AB
Öresundskraft Produktion AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Jörgen Held

Förord

Artificiella neurala nätverk har, för tillståndsovervakning under drift, integrerats och testats i befintligt datasystem på ett kraftvärmeverk. Ett tillhörande användargränssnitt har utvecklats tillsammans med en ekonomidel, för termoeconomisk driftoptimering, kopplad till de artificiella neurala nätverken.

Sammanfattning

Projektet avser modellering av hybridanläggningen vid Västhamnsverket i Helsingborg med artificiella neurala nätverk (ANN) samt integrering av ANN modeller, för online tillståndsovervakning och termoeconomisk optimering, på Västhamnsverket. Med hybridanläggning menas den pelletseldade ångcykeln som kombinerats med en modern gasturbin och tillhörande avgaspanna. Projektet är en fortsättning på tidigare projekt där träningen av ANN modellerna utfördes med driftdata från anläggningen. ANN modellerna har vid behov uppdaterats för att bättre passa ändamålet med detta projekt. Den termoeconomiska optimeringen tar hänsyn till aktuella elpriser, skatter, bränslepriser mm. och ger ett direkt mått på den aktuella produktionskostnaden tillsammans med den ”predikterade” produktionskostnaden. Verktöget har även en inbyggd funktion för att prognostisera när i framtiden en kompressortvätt är ekonomisk lönsam. Användargränssnittet har utvecklats i samarbete med medarbetare på Västhamnsverket för att säkerställa användbarheten. Användargränssnittet inkluderar funktioner så som varning och larm vid eventuella avvikelser i driften samt möjlighet till att plotta trendlinjer för parametrar, både uppmätta och predikterade, under vald tidsperiod.

Målgruppen för projektet är kraftverksägarna samt gasturbintillverkarna. Kraftverksägarnas intresse ligger i att erhålla en produkt som kan användas för tillståndsovervakning och termoeconomisk optimering av bl.a. underhåll. Gasturbintillverkarnas huvudintresse ligger i att undersöka möjligheten att kunna leverera ANN modeller tillsammans med nya gasturbiner.

Projektet har genomförts på LTH med stöd av Västhamnsverket och Siemens. Västhamnsverket har tillhandahållit driftdata från anläggningen samt stöd till analys av delsystemens funktion. De har även medverkat vid integreringen av ANN modellerna i deras datasystem samt vid utveckling av användargränssnittet. Siemens har bidragit med expertkunnskap om gasturbinen, SGT800.

En slutsats från förra projektet var att ANN modellering av termiska kraftverk och dess delsystem kan göras med hög noggrannhet. Mycket tack vare detta så kan även de termoeconomiska beräkningarna, kopplade till ANN modellerna, utföras med bra resultat. Integreringen av ANN modellerna och deras användargränssnitt, i Västhamnsverkets datasystem, visade sig fungera mycket bra. Med det framtagna verktyget kan anläggningens tillstånd övervakas samtidigt som eventuella avvikelser, så som degradering, värderas ekonomiskt.

Målen med projektet anses av författarna i stort vara uppfyllda.

Sökord: ANN modellering, termiska kraftverk, tillståndsovervakning, termoeconomisk optimering, gasturbin

Summary

The project aim is to model the hybrid plant at Västhamnsverket in Helsingborg using artificial neural networks (ANN) and integrating the ANN models, for online condition monitoring and thermoeconomic optimization, at Västhamnsverket. The definition of a hybrid plant is that it uses more than one fuel, in this case a natural gas fuelled gas turbine with heat recovery steam generator (HRSG) and a biomass fuelled steam boiler with steam turbine. The project is a continuation of previous projects where ANN training was done with operational data from the plant. The ANN models have, if required, been updated to better suit the purpose of this project. The thermoeconomic optimization takes into account current electricity prices, taxes, fuel prices etc. and calculates the current production cost along with the “predicted” production cost. The tool also has a built in feature of predicting when a compressor wash is economically beneficial. The user interface is developed together with co-workers at Västhamnsverket to ensure its usefulness. The user interface includes functions for warnings and alarms when possible deviations in operation occur and also includes a feature for plotting parameter trends in optional time intervals, both measured values and predicted.

The target group is the plant owners and the original equipment manufacturers (OEM). The power plant owners want to acquire a product for condition monitoring and thermoeconomic optimization of e.g. maintenance. The OEMs main interest lies in investigating the possibilities of delivering ANN models along with their new gas turbines.

The project has been carried out at Lund University, Department of Energy Sciences, with support from Västhamnsverket and Siemens. Västhamnsverket have contributed with operational data from the plant as well as support in plant related questions. They have also been involved in the implementation of the ANN models in their computer system and the development of the user interface. Siemens have contributed with expert knowledge about their gas turbine, the SGT800.

A conclusion from the previous project was that ANN modelling of thermal power plants and its components can be done with high accuracy. Because of this, good results can also be achieved for the thermoeconomic calculations connected to the ANN models. The implementation of the ANN models, and the accompanying user interface, in Västhamnsverkets computer system was carried out successfully. With the developed tool plant condition can be monitored while at the same time possible deviations, such as degradation, are economically evaluated.

Keywords: ANN modelling, thermal power plants, condition monitoring, thermoeconomic optimization, gas turbine

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	2
1.1	BAKGRUND	2
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSOMRÅDET	2
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSOMRÅDET	2
1.4	MÅL OCH MÅLGRUPP	3
2	VÄSTHAMNSVERKET	4
2.1	GASTURBIN, SGT800	5
2.2	ÅNGTURBIN, ATM	5
2.3	AVGASPANNA	6
2.4	FASTBRÄNSLEPANNA	6
3	ARTIFICIELLA NEURALA NÄTVERK, TEORI	7
3.1	ANN KONFIGURATION ANVÄND I DETTA PROJEKT	9
4	ARTIFICIELLA NEURALA NÄTVERK, MODELLERING	11
4.1	GASTURBIN, SGT800	11
4.2	ÅNGTURBIN, ATM	12
4.3	AVGASPANNA	13
4.4	FASTBRÄNSLEPANNA	14
5	EKONOMISKA STYRMEDEL INOM ENERGISEKTORN	16
5.1	KOLDIOXIDSKATT	16
5.2	ENERGISKATT	17
5.3	UTSLÄPPSRÄTTER	17
5.4	ELCERTIFIKAT	18
6	TERMOEKONOMISK ANALYS	19
6.1	GASTURBIN, SGT800	20
6.2	FASTBRÄNSLEPANNA	23
7	EKONOMISK OPTIMERING AV KOMPRESSORTVÄTTSTILLFÄLLEN	25
7.1	BERÄKNING AV DEGRADERINGSTREND	26
7.2	PROGNOSTISERING	28
8	INTEGRERING OCH ANVÄNDNING AV ONLINESYSTEM PÅ VÄSTHAMNSVERKET ...	32
8.1	SYSTEM 800xA	32
8.2	ANVÄNDARGRÄNSSNITT EXCEL	33
8.3	ONLINETEST AV GASTURBIN ANN	39
9	RESULTATREDOVISNING	41
10	RESULTATANALYS	42
11	SLUTSATSER	43
12	DISKUSSION	44
13	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	45
14	FÖRSLAG TILL FORTSATT FORSKNINGSARBETE	46
15	LITTERATURREFERENSER	47

Nomenklatur

H	Värmevärde	kWh/Nm ³ , MJ/kg
I	Intäkt	kr/MWh _{vä}
k	Korrektionsfaktor	-
k	Godtycklig neuron	-
K	Kostnad	kr/MWh _{vä}
m	Massflöde	kg/s, MJ/s
P	Eleffekt	MW
p	Tryck	kPa, MPa
Q	Värmeeffekt	MW
t	Temperatur	°C
t	Tid	-
w	Vikt	-
y	In- eller utdata från neuron	-
α	Kvoten mellan producerad el och producerad värme	%
η	Verkningsgrad	%

Förkortningar

ANN	Artificiellt neuralt nätverk
CH ₄	Metan
CO ₂	Koldioxid
EOH	Equivalent operating hours
EU	Europeiska unionen
FÖRÅ	Förångare
GT	Gasturbin
HRSG	Heat recovery steam generator
HTFV	Högtrycksförvärmare
ISO	Internationella standardiseringsorganisationen
MAVA	Matarvatten
NG	Naturgas
NO _x	Kväveoxider
OEM	Original equipment manufacturer
PGIM	Power generation information manager
PLC	Programmable logic controller
ppm	Parts per million
SGC	Svenskt gastekniskt center
SGT	Siemens gas turbine
ST	Steam turbine
VP	Värmepump
ÖH	Överhettare

Index

7	Turbinutlopp
atm	Atmosfär
avt	Avtappning
e	Efter
e, el	El
eco	Ekonomiser
fj.v.	Fjärrvärme
fram	Framledning
i	Dag
in	Inlopp
komp	Kompressor
kond	Kondensor
perm	Permanent
retur	Returledning
s	Ånga
temp	Temporär
th	Termisk
u	Undre
ut	Utlopp
v, vä	Värme

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Projektet, som är samfinansierat av Värmeforsk och Svenskt Gastekniskt Center (SGC), avser online tillståndsovervakning och termoeconomisk driftoptimering av hybridanläggningen vid Västhamnsverket i Helsingborg med artificiella neurala nätverk (ANN). För detta ändamål har ANN modeller integrerats i Västhamnsverket datasystem samt ett användargränssnitt utvecklats. Användargränssnittet inkluderar, bland annat, verktyg för parameteranalys, varnings- och larmindikator, produktionskostnadsanalys, samt ekonomisk optimering av kompressortvättstillfällen.

Kraftvärmeverket består av en modern gasturbin, SGT800, från Siemens med tillhörande avgaspanna samt en pelletseldad fastbränslepanna. Ånga genererad av fastbränslepannan och avgaspannan expanderar i en gemensam mottrycksturbin.

För att realisera konditionsbaserat underhåll krävs kontinuerlig övervakning av delsystemen i kraftverket. Avvikelse från förväntat datamönster indikerar komponentfel eller degradering som operatören uppmärksammas att åtgärda. Snabb detektering av fel leder därmed till reducerade underhållskostnader.

Projektet ingår i en projektserie utförda i samarbete mellan Lunds Universitet, Västhamnsverket och Siemens [1][2][3][4].

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

ANN modellering av kraftverkssystem är ett relativt nytt område även om ANN verktyget har använts inom andra discipliner. Forskarstudier som bedrivits på avdelningen för Kraftverksteknik på Lunds Universitet under senare år har utgjort de första försöken till att använda ANN för kraftverksmodellering. Flera användningsområden, så som simulering av drift, tillståndsovervakning, termoeconomisk analys, sensorvalidering och feldiagnostik, har identifierats. Nuvarande projekt är en fortsättning på tidigare arbeten. [5][6][7][8][9][10][11]

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Projektet är den senaste i en serie studier om Västhamnsverket och ANN modellering av hybridanläggningen. Inledningsvis användes syntetisk data, genererad med olika värme- och massbalansprogram, till träning av ANN modeller för simulering och feldiagnostik. Från och med förra projektet skedde en övergång till användning av driftdata från anläggningen till utveckling av ett tillståndsovervakningssystem för övergång till konditionsbaserat underhåll.

Ökad tillgänglighet och billigare samt effektivare underhåll för bränslebaserade kraftverk är huvudintresset för denna forskning. Genom att koppla mätdata, genererade under drift, till analys av anläggningens kondition och prestanda kan så väl underhåll som prestanda för anläggningen optimeras.

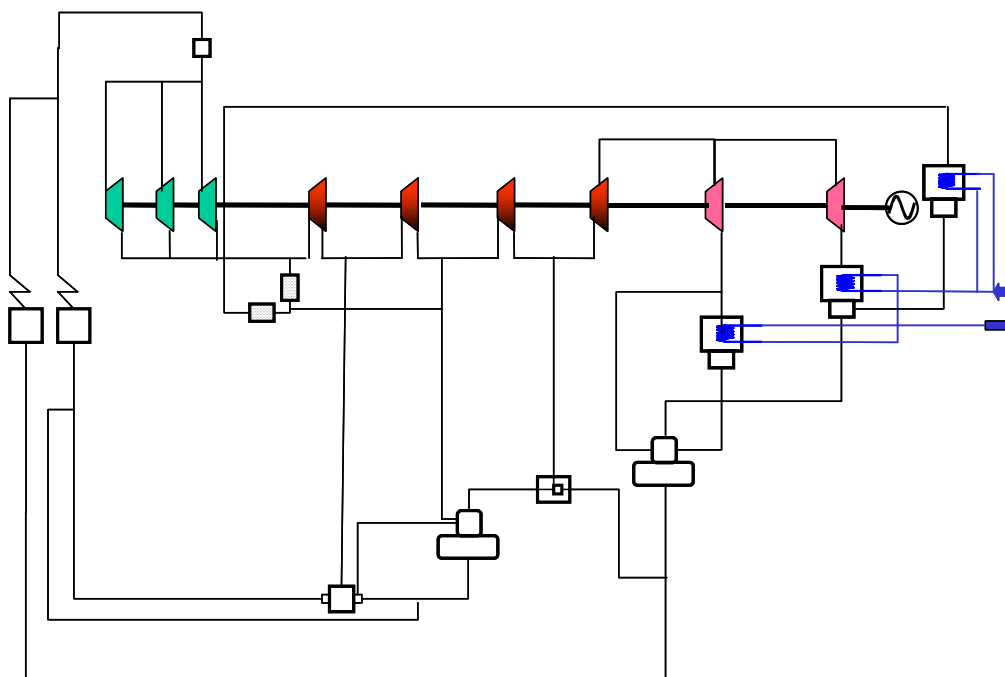
1.4 Mål och målgrupp

Målet med projektet är att skapa en färdig produkt integrerad på Västhamnverket med tillhörande användargränssnitt för tillståndsovervakning och termoeconomisk driftoptimering. Produkten kan användas som underlag för en övergång från tidsbaserat underhåll till konditionsbaserat underhåll.

Målgruppen för projektet är kraftverksägarna samt gasturbintillverkarna. Kraftverksägarnas intresse ligger i att erhålla en produkt som kan användas för tillståndsovervakning och termoeconomisk optimering av bl.a. underhåll. Gasturbintillverkarnas huvudintresse ligger i att undersöka möjligheten att kunna leverera ANN modeller tillsammans med nya gasturbiner.

2 Västhamnsverket

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 MWe 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 med mer än ett bränsle. Totaleffekten för hybridanläggningen är 126,7 MWe och 186 MW_v och systemlösningen är unik. Alfavärdet har 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. [1][2][3]

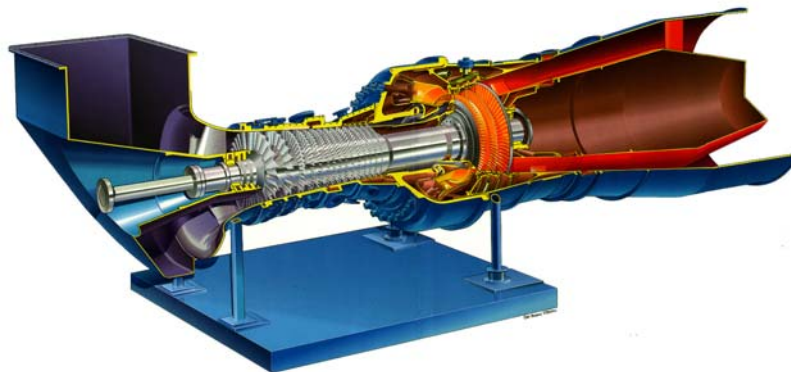


Figur 1. Förenklat kopplingsschema av hybridanläggningen [11]

Figure 1. Simplified flow diagram of the hybrid plant

2.1 Gasturbin, SGT800

Maskinen är utlagd för 43 MW och en termisk verkningsgrad på 37 %. Gasturbinen har mycket låga emissionsnivåer, under 15 ppm NO_x på gasbränsle.



Figur 2. Siemens SGT800 gasturbin [4]

Figure 2. Siemens SGT800 gas turbine

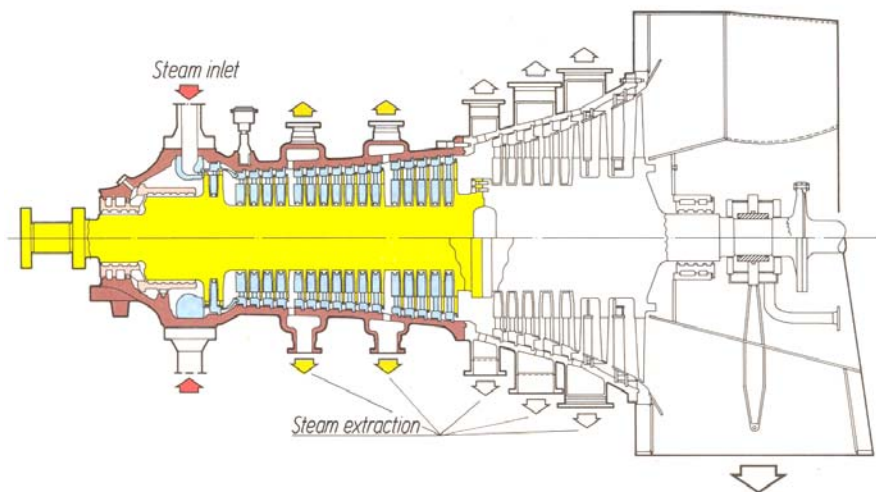
Maskinen är enaxlig och driver generatoren med den "kalla" sidan vilket innebär att man kan ha en effektiv lång konisk diffusor efter turbinen, se Figur 2. Kompressorn består av 15 steg och tryckförhållandet är ca 20, med ett flöde på ca 130 kg/s. I brännkammaren tillförs bränsleeffekt på ca 120 MW och 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. [1][2][3]

Den första SGT800 maskinen (produktionsprototypen) levererades till Helsingborg under 1999 och togs i drift för de första verifieringsproven senhösten 1999. Maj 2007 hade 52 SGT800 maskiner sålts varav 22 var i kommersiell drift. Två av dessa har 45 000 EOH och 17 maskiner har över 20 000 EOH. 10 maskiner ska gå/går i enkelcykel, 17 i värmekraftverk för både el- och värmeproduktion samt 25 i kombicykel.

2.2 Ångturbin, ATM

Ångturbinen som används i bottenkylaren 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 välfortjänt renommé som robust och mycket driftsäker, med litet underhållsbehov. [1][2][3]



Figur 3. ATM maskin i kondensutförande [4]

Figure 3. ATM machine in condense design

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-stegen. 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. [1][2][3]

2.3 Avgaspanna

De heta rökgaserna från gasturbinen värmeväxlas i en ekonomiser, förångare samt två överhettare för att producera ånga till ångturbinen. Avgaspannan, som är av entryckstyp, levererar vid fullast ca 15 kg överhettad ånga per sekund vid 105 bar och 520°C. Utöver detta finns även en fjärrvärmeekonomiser med ett ungefärligt effektuttag på 20 MW.

2.4 Fastbränslepanna

Fastbränslepannan, som numera eldas med 100 % biobränsle, består i stora drag av en ekonomiser, ångdom, förångare samt ett antal överhettare. Atmosfärsluften förvärms i en luftförvärmare av system Ljungström. Det finns även en fjärrvärmeekonomiser inbyggd i rökgasstråket med ett ungefärligt värmeuttag på 6 MW. Konvertering till biobränsle har krävt ombyggnader av både bränslekvavar och rökgasfläkt för att hantera de större flödena av så väl bränsle som rökgas. Värmeeffekten i pannan är ca 250 MWth och den levererar ca 80 kg överhettad ånga per sekund vid 110 bar och 540°C. Bränsleinmatningen sker tangentiellt i tre olika nivåer i pannan.

3 Artificiella Neurala Nätverk, teori

Tillskillnad från traditionella matematiska modeller, som programmeras, så lär sig ANN samband mellan indata och utdata. Detta görs i en process som kallas träning, där data presenteras för ANN i en iterativ process. Det naturliga kravet blir då att data (både in- och utdata) måste finnas tillgängligt. ANN kan hitta samband (så länge där finns ett samband) mellan indata och utdata oavsett om de är enkla, oerhört komplicerade eller t.o.m. okända. För att exemplifiera det hela så används nedanstående ekvation för att generera lite in- och utdata till Tabell 1. [5][12]

$$y = \frac{x^2}{3}$$

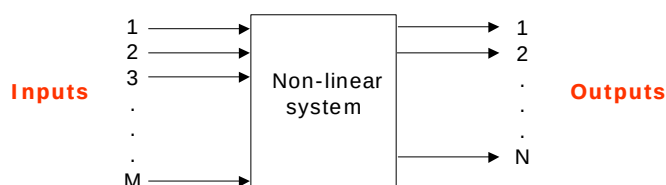
Tabell 1. In- och utdata genererade av ekvation

Table 1. Input and output data generated with equation

x (indata)	y (utdata)
3	3
6	12
9	27
12	48
15	75
18	108
21	147

Låt oss säga att ekvationen, som representerar sambandet mellan in- och utdata, är okänd men tabellen med data finns tillgänglig. I ett sådant scenario kan ANN tränas med dessa data för att hitta sambandet mellan x och y. Efter träningen så låses nätverket och när ny indata presenteras så genereras motsvarande utdata. Säg x = 10 används, då skulle ANN svara med y = 33,3 (eller åtminstone väldigt nära, beroende på framgången vid träningen). Denna förmåga, att leverera utdata från tidigare osedd indata, kallas generalisation. Man kan jämföra processen med en kurvanpassning.

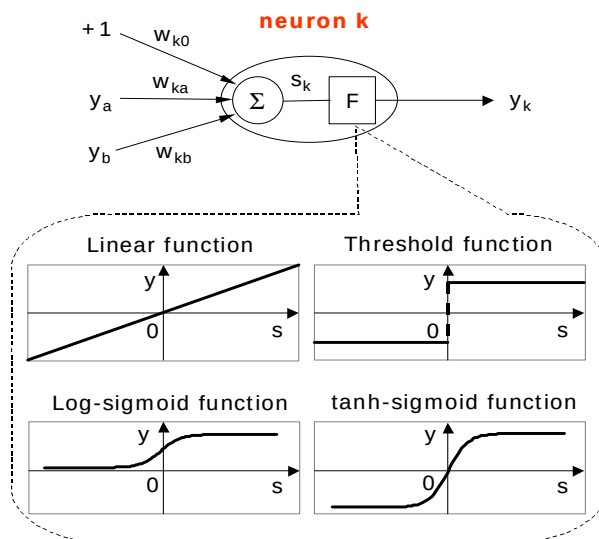
ANN är inte begränsad till att bara ha en in- och utdataparameter utan lämpar sig väl för icke-linjära multidimensionella system, d.v.s. flera in- och utdata med icke-linjära samband enligt Figur 4. [5]



Figur 4. Ickelinjärt, multidimensionellt system [5]

Figure 4. Non-linear, multidimensional system

För att få en inblick i hur själva ANN är uppbyggt så visas i Figur 5 en artificiell neuron tillsammans med de vanligaste överföringsfunktionerna.



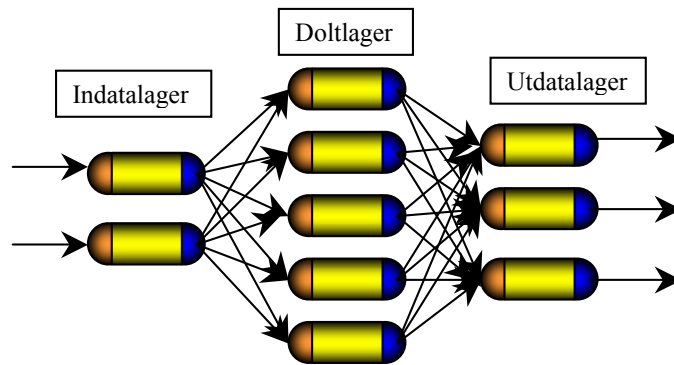
Figur 5. Schematisk representation av en artificiell neuron samt vanliga överföringsfunktioner [5]

Figure 5. Schematic representation of an artificial neuron with common transfer functions

Det som händer i neuronerna är att indata (i denna figur y_a samt y_b) multipliceras med sina respektive vikter (w_{ka} och w_{kb}) för att sedan summeras till en s.k. effektiv indata (s_k) vart på denna passerar genom en överföringsfunktion (i bilden visas fyra exempel på funktioner, men i verkligheten väljs endast en beroende på problemets beskaffenheter). Det som kommer ut ur överföringsfunktionen är själva utdata, y_k . Ettan som syns ovanför indata är en s.k. bias och representerar en offset som även den multipliceras med sin egen vikt, w_{k0} . [5]

När träningen initieras så tilldelas vikterna randomiserade värden vart på de första indata presenteras för modellen. Självklart kommer den utdata som genereras inte matcha verklig utdata. Felet som uppstår, mellan predikterad utdata och verklig utdata, används för att uppdatera vikterna (w_{ka} , w_{kb} samt w_{k0}). Vikterna justeras utifrån respektive indatas inflytande på utdata. Denna process motsvarar en epoch (iteration) och för varje genomförd epoch så kommer felet mellan predikterad och verklig utdata att minska. [5][12]

Eftersom varje neuron bara har en utdata så bygger man upp nätverk av neuroner lagervis (därför neurala nätverk), vanligtvis bestående av ett indata-, ett dolt- och ett utdatalager, enligt Figur 6. För att anpassa nätverket för bästa prestanda så kan antalet neuroner i det dolda lagret varieras.

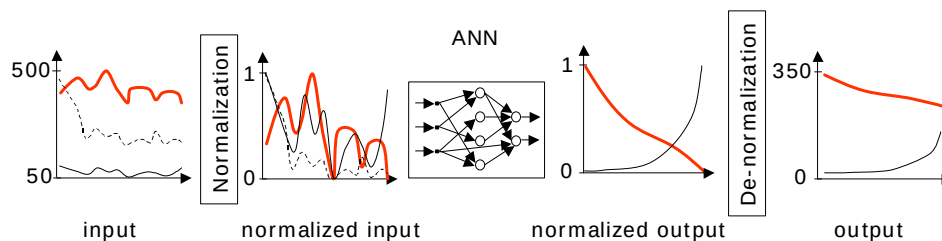


Figur 6. Artificiellt neuralt nätverk med ett indatalager, ett dolt- och ett utdatalager [4]

Figure 6. Artificial neural network with one in-, one hidden- and one output layer

Den totala datamängden delas upp i tre delar innan träning, en del för just träning, en för validering och en för test. Träningsdata används för att generera felen (som beskrevs ovan) medan validerings data används för att testa nätverkets prestanda under träning för att undvika överträning. Den sista delen, testdata, används för att kontrollera nätverket med oberoende data efter det är färdigtränat (jämför $x = 10$ i exemplet tidigare). [5]

Innan data används för träning så måste den normaliseras för att undvika att en signal som är större än de andra blir dominant, efter träningen så denormaliseras data igen. [5]



Figur 7. För- och efterbehandling av data [5]

Figure 7. Pre- and post treatment of data

3.1 ANN konfiguration använd i detta projekt

Vid modellering av termiska kraftverk har det visat sig, genom mångårig erfarenhet inom institutionen, att användande av en ANN struktur med ett indatalager, ett dolt lager samt ett utdatalager är att föredra. Det har även visats att ett dolt lager räcker för att uppskatta vilken kontinuerlig funktion som helst [5]. Som överföringsfunktioner har tangens hyperbolicus använts då den har icke-linjära egenskaper som är önskvärda vid modellering av anläggningar med icke-linjärt beteende. Data har, utifrån erfarenhet, normaliserats i intervallet -0.8 till 0.8 vilket bl.a. medför att det resulterande nätverket kommer att ha förmåga till extrapolering [10]. Bakom varje ANN modell ligger en variation av antalet neuroner i det dolda lagret. Dessa variationer utförs i regel i

intervallet 5 till 20 vart på det bäst konvergerande nätverket sparas. Att ange exakt vilken konfiguration som sparats för respektive modell anses inte vara av någon större vikt eftersom det kan variera från träning till träning.

4 Artificiella Neurala Nätverk, modellering

Vissa av ANN modellerna som togs fram under föregående projekt har uppdaterats med avseende på in- och utdataparametrar för att bättre passa syftet med detta projekt. När man ska göra en ekonomisk analys av anläggningen, t.ex. beräkna produktionskostnaden, så måste man ha tillgång till vissa parametrar så som bränsleflöden samt el- och värmeeffekter. Fokus vid uppdateringen av ANN modellerna har därför legat på att lägga till utdataparametrar som kan användas vid beräkning av produktionskostnaden. Respektive ANN modell, och eventuella uppdateringar, behandlas i separata stycken nedan. För mer information om respektive ANN modell, konfiguration, noggrannhet osv. så hänvisar vi till 'Modellering av hybridanläggning samt utveckling av övervakningssystem för Västhamnsverket baserat på Artificiella Neurala Nätverk' [4].

4.1 Gasturbin, SGT800

Gasturbinmodellen som utvecklades under förra projektet har hög noggrannhet och valda utdataparametrar passar ändamålet för detta projekt. Till exempel finns både producerad eleffekt och bränsleflöde med bland utdata, vilka är huvudparametrarna för en ekonomisk analys. Gasturbinmodellen har därför inte modifierats och dess konfiguration samt noggrannhet visas i Tabell 2 och Tabell 3.

Tabell 2. In- och utdataparametrar för gasturbinmodellen [4]

Table 2. In- and output parameters for the gas turbine model

Indata		Utdata	
Effektreglering	[1 eller 0]	Kompressor inloppstryck	[kPa]
Anti Icing	[1 eller 0]	Ledskenor, läge	[%]
Atmosfärstemperatur	[°C]	Temperatur avtappning 10	[°C]
Atmosfärstryck	[kPa]	Kompressor utloppstryck	[MPa]
		Kompressor utloppstemperatur	[°C]
		Massflöde naturgas	[MJ/s]
		Massflöde turbin	[kg/s]
		Rökgastemperatur (t_7)	[°C]
		Eleffekt	[MW]

Tabell 3. Felfördelning vid prediktion av utdata med gasturbin ANN [4]

Table 3. Error distribution for prediction of outputs with the gas turbine ANN

Felfördelning	<1%	1-2%	2-4%	>4%
Kompressor inloppstryck	7239	0	0	0
Ledskenor, läge	6489	558	183	9
Temperatur avtappning 10	7142	90	6	1
Kompressor utloppstryck	7234	3	2	0
Kompressor utloppstemperatur	7223	16	0	0
Massflöde naturgas	6649	579	8	3
Massflöde turbin	7229	8	2	0
Rökgastemperatur (t_7)	7239	0	0	0
Eleffekt	7179	58	1	1

4.2 Ångturbin, ATM

Ångturbinmodellen har förändrats både med avseende på in- och utdata. Syftet har varit att inkludera fjärrvärmekondensornas värmeeffekt som utdata, och för att göra detta med tillfredställande noggrannhet så har den levererade värmeeffekten från värmepumpen samt ekonomisern lagts till som indata. Både värmepumpen och rökgasekonomisern ligger på samma fjärrvärmekrets som fjärrvärmekondensornas och att bara använda retur- och framledningstemperatur på fjärrvärmevattnet (tillsammans med ångdata) är därför inte tillräckligt. Värmeeffekten är intressant att prediktera eftersom vid en ekonomisk analys så beräknas ofta, även så i detta fall, produktionskostnaden i kronor per producerad megawattimme värme. Fjärrvärme måste alltid levereras till fjärrvärmekunderna på ett eller annat sätt så detta är ett bra sätt att jämföra olika anläggningars produktionskostnad med varandra. Den uppdaterade ångturbinmodellens in- och utdata visas i Tabell 4 och prediktionsnoggrannheten visas i Tabell 5.

Tabell 4. In- och utdataparametrar för ångturbinmodellen [4]

Table 4. In- and output parameters for the steam turbine model

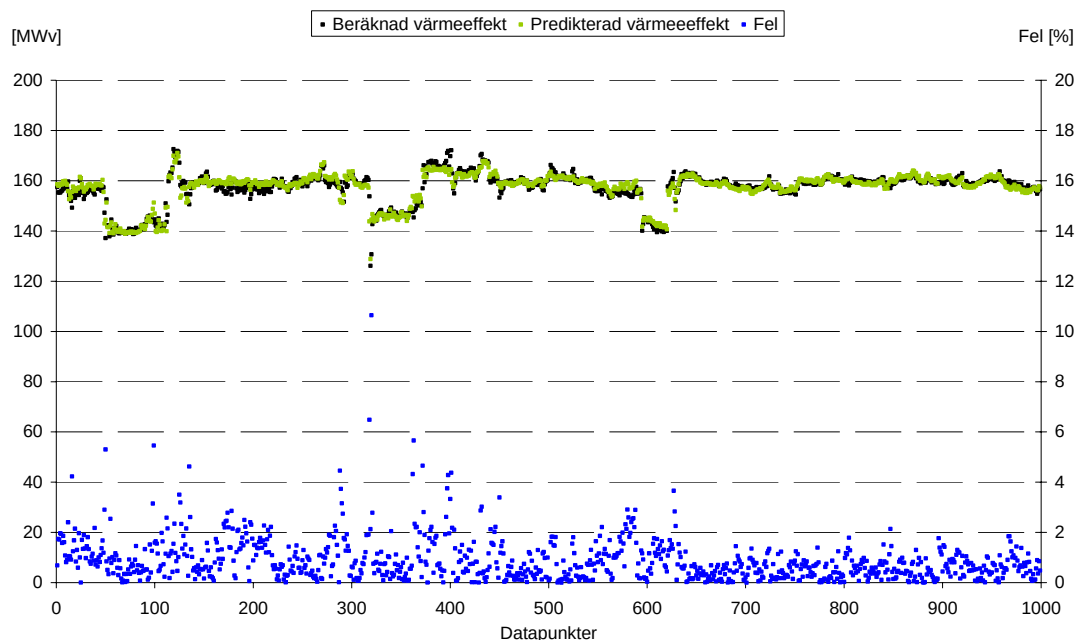
Indata		Utdata	
Massflöde ånga avgaspanna	[kg/s]	Eleffekt	[MW]
Massflöde ånga panna	[kg/s]	Temperatur matarvatten efter HTFV	[°C]
Temperatur ånga panna	[°C]	Effekt fjärrvärmekondensorer	[MW]
Temperatur framledning	[°C]		
Temperatur returledning	[°C]		
Effekt värmepump	[MW]		
Effekt ekonomiser	[MW]		

Tabell 5. Felfördelning vid prediktion av utdata med ångturbin ANN

Table 5. Error distribution for prediction of outputs with the steam turbine ANN

Felfördelning	<1%	1-2%	2-4%	>4%
Eleffekt	2795	94	10	1
Temperatur matarvatten efter HTFV	2900	0	0	0
Effekt fjärrvärmekondensorer	1655	736	354	155

Felen vid prediktion av värmeeffekten från fjärrvärmekondensorer är lite högre än vid prediktion av de andra utdataparametrarna, vilket kan härledas bland annat till det faktum att värmeeffekten är en framräknad storhet som beror på ett flertal sensorer. Under givna förutsättningar är dock prediktionerna bra och fullt användbara vid beräkning av produktionskostnaden. Figur 8 visar träffsäkerheten i ANN modellen.



Figur 8. ANN prediktioner jämfört beräknad värmeeffekt från fjärrvärmekondensorer

Figure 8. Comparison of ANN predictions and calculated heat production

4.3 Avgaspanna

ANN modellen för avgaspannan är, precis som den för gasturbinen, lämnad oförändrad. Den viktigaste parametern i avgaspannan, för beräkning av produktionskostnaden, är uttagen värmeeffekten i fjärrvärmeeconomiser och denna är sedan tidigare inkluderad som utdataparameter i modellen. En komplett lista på in- och utdataparametrar återfinns i Tabell 6 och felfördelningsstatistik vid prediktion återfinns i Tabell 7.

Tabell 6. In- och utdataparametrar för avgaspannmodellen [4]

Table 6. In- and output parameters for the HRSG model

Indata		Utdata	
Anti Icing	[1 eller 0]	Massflöde fjärrvärme	[m ³ /h]
Atmosfärstryck	[kPa]	Massflöde ånga	[kg/s]
Atmosfärstemperatur	[°C]	Temperatur efter överhettare 1	[°C]
Effektreglering	[1 eller 0]	Temperatur efter överhettare 2	[°C]
Temperatur fjärrvärme retur	[°C]	Temperatur på utgående rökgaser	[°C]
Temperatur fjärrvärme fram	[°C]	Effekt fjärrvärme ekonomiser	[MW]

Tabell 7. Felfördelning vid prediktion av utdata med avgaspanna ANN [4]

Table 7. Error distribution for prediction of outputs with the HRSG ANN

Felfördelning	<1%	1-2%	2-4%	>4%
Massflöde fjärrvärme	3387	2225	1188	165
Massflöde matarvatten	5757	1019	165	24
Temperatur efter överhettare 1	6949	16	0	0
Temperatur efter överhettare 2	6965	0	0	0
Temperatur på utgående rökgaser	6481	464	17	3
Effekt fjärrvärme ekonomiser	4729	1711	453	72

4.4 Fastbränslepanna

Tidigare var massflödet pellets indata till ANN modellen men har nu flyttats till utdatasidan istället. Värmeeffekten från rökgasekonomisern är ytterligare ett tillskott bland utdataparametrarna. Hela listan på parametrar finns i Tabell 8, prediktionsnoggrannheten för modellen syns i Tabell 9 och prediktioner för massflöde pellets är plottade i Figur 9.

Tabell 8. In- och utdataparametrar för fastbränslepannmodellen [4]

Table 8. In- and output parameters for the solid fuel boiler model

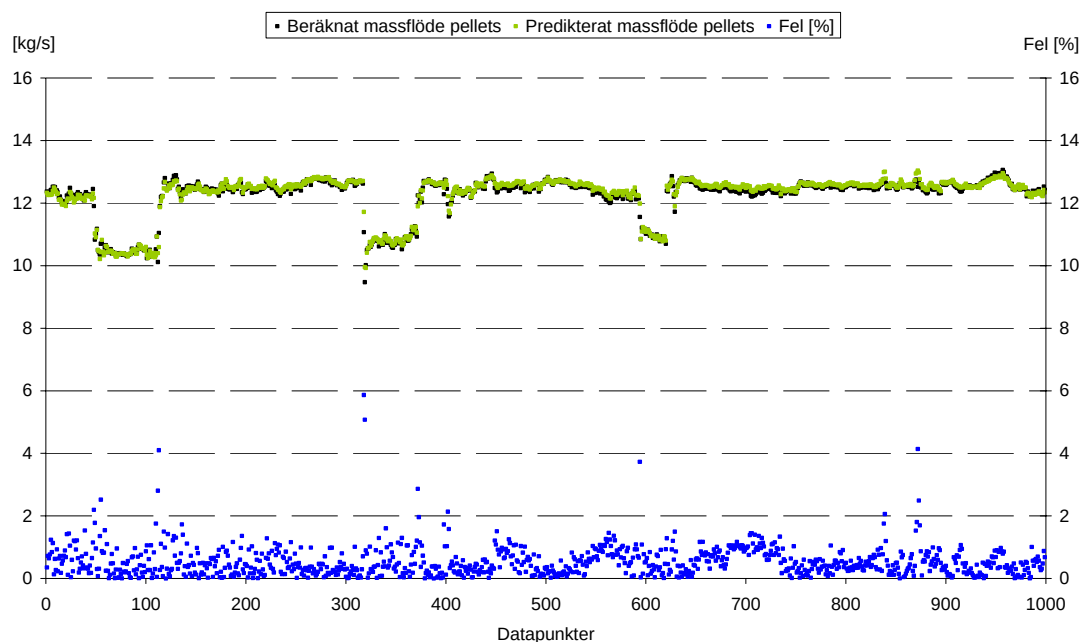
Indata		Utdata	
Temperatur matarvatten efter HTFV	[°C]	Massflöde ånga	[kg/s]
Tryck matarvatten före HTFV	[MPa]	Temperatur ånga	[°C]
		Massflöde pellets	[kg/s]
		Värmeeffekt rökgaseko	[MW]

Tabell 9. Felfördelning vid prediktion av utdata med fastbränslepanna ANN

Table 9. Error distribution for prediction of outputs with the solid fuel boiler ANN

Felfördelning	<1%	1-2%	2-4%	>4%
Massflöde ånga	2628	229	25	18
Temperatur ånga	2332	517	51	0
Massflöde pellets	2462	400	30	8
Värmeeffekt rökgasekonomiser	157	168	389	2186

Värmeeffekten från rökgasekonomisern har visat sig svår att modellera och skulle kanske i normala fall förkastas som utdata men behövs för de ekonomiska beräkningarna då de görs i enheten kronor per megawattimme värme. Värmeeffekten från rökgasekonomisern är dock, i förhållande till värmeeffekten från fjärrvärmekondensorerna, liten (ca 6 MW) och påverkar därför det slutliga resultatet marginellt. Alternativt kan denna värmeeffekt antas vara konstant istället.



Figur 9. ANN prediktioner jämfört beräknat massflöde pellets

Figure 9. Comparison of ANN predictions and calculated mass flow of pellets

5 Ekonomiska styrmedel inom energisektorn

Eftersom en stor del av detta projekt handlar om att koppla ekonomiska beräkningar till framtagna ANN modeller så förtjänar de olika ekonomiska styrmedlens utformning och funktion en närmare beskrivning. Grundidén är att, utöver prestandaprediktionerna för anläggningen, ha ett mått på produktionskostnaden och därmed en uppfattning om vad degradering, eller på annat sätt ickeoptimal drift, innebär rent ekonomiskt. Eftersom ANN modellerna hela tiden predikterar vad en frisk anläggning borde leverera så ger ekonomiska beräkningar baserat på detta ett mått på vad produktionen borde kosta. Ett exempel är om gasturbinen skulle vara degraderad och därmed förbruka mer bränsle än en odegraderad maskin, vilket i sin tur resulterar i en högre produktionskostnad än nödvändigt. Skatter, så som koldioxidskatt, baseras på den förbrukade mängden bränsle och kommer därmed också bidra till en ökad produktionskostnad.

Svavelskatt och kväveoxidavgift diskuteras inte i detalj eftersom de inte/knappt påverkar produktionskostnaden. Svavelskatt tas ut för fossila bränslen som omfattas av energi- och koldioxidskatt samt torv, d.v.s. inte pellets. Naturgas innehåller så lite svavel (<0.05 viktprocent) att även den är befriad från svavelskatt. Kväveoxidavgift tas ut oberoende av bränsletyp utan baseras helt på den mängd kväveoxider som släpps ut i atmosfären. Kväveoxidavgiften är dock statsfinansiellt neutral och återbetalas i proportion till respektive anläggnings energiproduktion vilket innebär att endast de med störst utsläpp per producerad nyttiggjord energi blir nettobetalare [13]. Västhamnsverket har i det här fallet antagits ligga på medelvärde i Sverige vilket innebär att hela den kväveoxidavgift som betalas in fås tillbaka. I själva verket har man de senaste åren legat under snittet och fått tillbaks lite mer pengar än vad som betalats in, hur mycket varierar dock från år till år. [14][15][16][17]

5.1 Koldioxidskatt

Koldioxidskatt är en svensk punktskatt som tas ut i samband med förbränning av fossila bränslen så som kol, olja och naturgas med syftet att minska koldioxidutsläppen. Elproduktion är befriad från koldioxidskatt medan värmeproduktion i värmekraftverk (så som Västhamnsverket) belastas med 21 % av koldioxidskatten. Den andel bränsle som går till egenförbrukad el för elproduktion belastas med full koldioxidskatt. Vid ren värmeproduktion betalas 100 % av koldioxidskatten. [16][17]

Tabell 10. Koldioxidskatt för olika bränslen [15]

Table 10. Carbon tax on various fuels

Bränsleslag	Koldioxidskatt
Kol	2317 kr/ton
Olja (EO5)	2663 kr/m ³
Naturgas	1994 kr/km ³

Olika typer av bränsle har olika energiinnehåll, beroende på sammansättningen, och det går därför åt olika mycket av respektive bränsle för att generera en bestämd mängd energi. Ju större andel av energin som kommer från väte istället för kol desto lägre

koldioxidutsläpp fås eftersom väte bildar vatten tillsammans med syre medan kol bildar koldioxid. Naturgas har till exempel en stor andel metan, CH₄, vilket betyder att det finns (för just denna komponent i gasen) fyra väteatomer men bara en kolatom. Skattesatsen för respektive bränsle står i proportion till hur mycket koldioxid som bildas när en bestämd mängd energi produceras.

5.2 Energiskatt

Energiskatt är liksom koldioxidskatt en punktskatt som tas ut på fossila bränslen. Elproduktion är befriad från energiskatt och likaså är värmeproduktion i värmekraftverk. Den andel bränsle som går till egenförbrukad el för elproduktion belastas däremot med full energiskatt. Vid ren värmeproduktion betalas full energiskatt. [16][17][18]

Tabell 11. Energiskatt för olika bränslen [15]

Table 11. Energy tax on various fuels

Bränsleslag	Energiskatt
Kol	319 kr/ton
Olja (EO5)	750 kr/m ³
Naturgas	243 kr/km ³

Till skillnad från koldioxidskattesatserna, som bestäms utifrån kolinnehållet i bränslet, så bestäms energiskattesatserna på årsbasis utifrån aktuell skattepolitik. D.v.s. vill man främja användandet av ett bränsle så kan skatten för detta sänkas, alternativt skatten för de andra höjas. [16][17] [18]

5.3 Utsläppsrätter

Utsläppshandeln tillkom som ett led i EU:s mål att minska utsläppen av växthusgaser i enlighet med Kyotoprotokollet. För närvarande innefattar systemet endast utsläpp av koldioxid med kan komma att utökas för att innefatta även andra växthusgaser. Respektive medlemsland bestämmer hur utsläppsrätterna ska fördelas bland berörda företag inom landet. Denna s.k. fördelningsplan granskas sen av EU-kommissionen för att fastställa om utsläppstaket för landet under aktuell handelsperiod är förenliga med unionens mål samt landets åtagande enligt Kyotoprotokollet. Bland de berörda anläggningarna finns bl.a. ”förbränningsanläggningar med en installerad kapacitet över 20MW”. [16][17] [18]

Under innevarande handelsperiod, 2005-2007, så skulle 95 % av utsläppsrätterna delas ut gratis till de berörda företagen medan denna siffra ska minskas till 90 % under nästa handelsperiod, 2008-2012. I Sverige har/ska dock alla utsläppsrätter delas ut gratis. Varje utsläppsrätt motsvarar ett ton koldioxid och om ett företag skulle släppa ut mer koldioxid än vad utsläppsrätterna täcker så måste fler utsläppsrätter köpas på marknaden. Tvärtom, företag som släpper ut mindre koldioxid än de har utsläppsrätter för kan välja att sälja sina utsläppsrätter till andra företag, alternativt spara utsläppsrätterna till kommande år under handelsperioden. [16][17] [18]

5.4 Elcertifikat

Systemet med elcertifikat tillkom 2003 och har som syfte att öka andelen förnyelsebar elproduktion. Till förnyelsebara energikällor räknas vind-, sol-, våg- och geotermisk energi samt vissa typer av biobränslen och viss vattenkraft. Producenterna av förnyelsebar el tilldelas ett elcertifikat per producerad megawattimme el. Efterfrågan på elcertifikat skapas med hjälp av en kvotplikt som anger hur stor andel av förbrukad el som ska vara från förnyelsebara källor. Kvoten varierar från år till år och är definierad fram till och med år 2030. Tabell 12 visar kvotnivåerna från införslen av systemet till år 2015, nivåerna är anpassade för att skapa en växande marknad för elcertifikaten. [16][17] [18]

Tabell 12. Kvotnivåer för förnyelsebar elproduktion år 2003 – 2015 [17]

Table 12. Quotation levels for renewable fuels year 2003 – 2015

År	Kvot [%]
2003	7,4
2004	8,1
2005	10,4
2006	12,6
2007	15,1
2008	16,3
2009	17,0
2010	17,9
2011	17,9
2012	17,9
2013	8,9
2014	9,4
2015	9,7

6 Termoekonomisk analys

Produktionskostanden delas upp på de två produktionssätten, gasturbin/naturgas och fastbränslepanna/pellets och inkluderar även intäkter, förutom den för producerad värme. Eftersom dessa är tätt sammanlänkade genom Västhamnverkets hybridkonfiguration måste speciell hänsyn tas vid beräkning av respektive produktionssätts produktionskostnad. En detaljerad beskrivning av beräkningsmetodiken finns i kapitel 6.1 och 6.2.

Generellt gäller att el- och värmeproduktion är mycket mer lönsam vid eldning av pellets i fastbränslepannan än naturgas i gasturbinen. Gasturbinen är enbart lönsam de kallaste vintermånaderna då verkningsgraden är hög och elpriset likaså. För att exemplifiera detta så har produktionskostnaden beräknats, dels baserat på uppmätta värden och dels baserat på ANN prediktioner, för en bestämd tidsperiod vid varierande driftsförhållanden (atmosfärstillstånd, fjärrvärmtemperaturer mm.). Gasturbinen kördes under denna period på fullast och med anti icing igång. En variation av elpriset gjordes mellan 140 och 1000 kronor per megawattimme och resultatet ses i Figur 10. Övriga indata för denna simulering finns listade i Tabell 13. Vissa intäkter är inkluderade i beräkningen av produktionskostnaderna och därför blir värdet negativt vid en viss punkt.

Tack vare högre alfavärde så reagerar gasturbinprocessen snabbare på ändringar i elpris och med givna förutsättningar finns en brytpunkt vid ca 630 kronor per megawattimme då det blir mer lönsamt att elda naturgas i gasturbinen. Dock ska det påpekas att man bara kan utnyttja resurserna för gasturbinen fullt ut när den är i drift tillsammans med fastbränslepannan eftersom den mängd ånga som produceras i avgaspannan är för liten att ensam expanderas i den gemensamma ångturbinen.

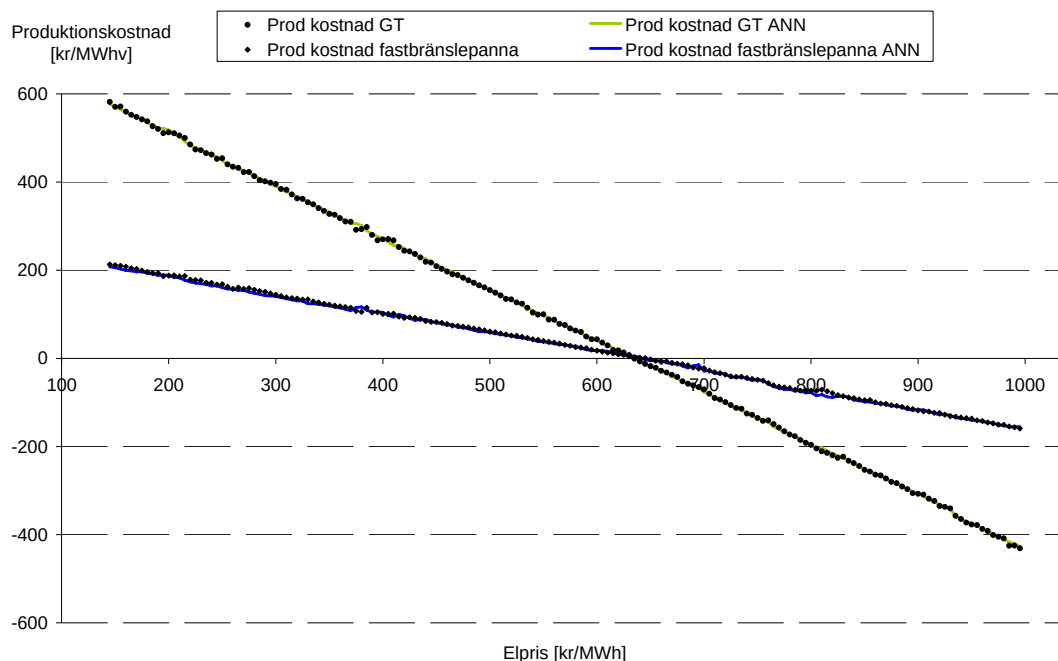
I fallet Västhamnsverket ska dessa två produktionssätt jämföras med värmepumpen och hetvattencentralen Israel, beskrivna i kapitel 2. Att avgöra direkt vilken eller vilka anläggningar som ska köras, och hur de ska köras beror på många faktorer och det bör påpekas att enbart titta i ett produktionskostnadsdiagram inte är tillräckligt.

Det huvudsakliga ändamålet, i detta projekt, med att beräkna produktionskostnaderna är att kunna utvärdera vad ickeoptimal drift innebär ekonomiskt och på så sätt kunna optimera driften. Ett exempel kan vara när en anläggning är degraderad och inte levererar förväntad eleffekt men fortfarande förbrukar lika mycket bränsle. Då skulle det uppstå en skillnad i produktionskostnaden beräknad på uppmätt data jämfört produktionskostnaden beräknad på predikterad data, som anger odegraderad prestanda. Genom att ha ett ekonomiskt mått på denna skillnad kan drift (och underhåll) lättare optimeras.

Tabell 13. Indata vid beräkning av produktionskostnad

Table 13. Inputs for calculation of production cost

Indata		
Gaspris	185	kr/MWh
Gasnät	35	kr/MWh
Elnät	13	kr/MWh
Koldioxidskatt	1994	kr/kNm3
Energiskatt	243	kr/kNm3
Utsläppsrätter	200	kr/ton
Pelletspris	225	kr/MWh
Elcertifikat	170	kr/MWh



Figur 10. Produktionskostnad, gasturbin och fastbränslepanna

Figure 10. Production cost, gas turbine and the solid fuel boiler

6.1 Gasturbin, SGT800

För beräkning av produktionskostnaden så används fyra huvudposter och några mindre poster. De fyra huvudposterna är bränslekostnad, koldioxidskatt, kostnad för utsläppsrätter samt intäkter för såld el. De mindre posterna är underhållskostnader samt skattekostnader för egenförbrukad el till elproduktion.

$$K_{\text{produktion}} \left[\frac{\text{kr}}{\text{MWh}_{\text{vä}}} \right] = K_{\text{NG}} + K_{\text{skatt}} + K_{\text{utsläppsrätter}} - I_{\text{el}} + K_{\text{underhåll}} + K_{\text{skatt egenförbr.}}$$

Vid beräkning av produktionskostnaden för el producerad med gasturbinen så används ett antal parametrar som finns både uppmätta som predikterade. Eftersom dessa

parametrar finns både uppmätta som predikterade kan en jämförelse göras av vad produktionen borde kosta och vad den faktiskt kostar. Exempel på parametrar som används är eleffekt för gas- och ångturbin, bränsleflöde och värmeeffekten i både fjärrvärmeekonomiser och fjärrvärmekondensorer.

6.1.1 Bränslekostnad

Bränslekostnaden beräknas med hjälp av bränsleflödet samt aktuellt gaspris och nätavgift. Produkten av dessa divideras med den av gasturbinen producerade värmeeffekten, för att få kostnaden i enheten kronor per producerad megawattimme värme. Gasturbinen genererar värmeeffekt framförallt genom fjärrvärmeekonomisern placerad i avgaspannan men även genom fjärrvärmekondensorererna eftersom en del av ångflödet till ångturbinen kommer från avgaspannan. Andelen värmeeffekt, producerad i fjärrvärmekondensorererna, som härrör från gasturbinen beräknas med en massflödeskvot.

$$K_{NG} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = \frac{\dot{m}_{NG} \left[\frac{MJ}{s} \right] \cdot \left(pris_{NG} \left[\frac{kr}{MWh} \right] + pris_{gasn\ddot{a}t} \left[\frac{kr}{MWh} \right] \right)}{\dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}] + \left(\frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \cdot \dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}]}$$

6.1.2 Kostnad för koldioxidskatt

Som nämndes i kapitel 5.1 så belastas 21 % av värmeproduktionen i kraftvärmeverk med koldioxidskatt. Genom att använda alfavärdet (kvoten mellan producerad el och producerad värme) kan den del av bränsleflödet som åtgår för värmeproduktionen beräknas. Detta multipliceras med aktuell koldioxidskatt för naturgas, som är det primära bränslet i gasturbinen. Precis som vid beräkning av bränslekostnaden så divideras allt med den av gasturbinen producerade värmeeffekten.

$$K_{skatt} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = 0.21 \cdot \frac{\left(\frac{1}{1+\alpha} \right) \cdot \dot{m}_{NG} \left[\frac{MJ}{s} \right] \cdot skatt_{CO_2} \left[\frac{kr}{kNm^3} \right]}{H_u \left[\frac{kWh}{Nm^3} \right] \cdot \left(\dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}] + \left(\frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \cdot \dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}]} \right)}$$

För att beräkna alfavärdet så divideras den av gasturbinen producerade eleffekten med den av gasturbinen producerade värmeeffekten. Eleffekten är summan av gasturbineffekten och en andel eleffekt från ångturbinen. Värmeeffekten kommer framförallt från fjärrvärmeekonomisern i avgaspannan men även från fjärrvärmekondensorererna kopplade till avtappningar i ångturbinen.

$$\alpha = \frac{P_{GT} [MW] + P_{ST} [MW] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right)}{\dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}] + \left(\frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \cdot \dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}]}$$

6.1.3 Kostnad för utsläppsrätter

Kostnaden för utsläppsrätter beräknas genom att massflödet naturgas multipliceras med en emissionsfaktor, som anger hur mycket koldioxid som bildas när naturgas förbränns, samt aktuellt pris för en utsläppsrätt.

$$K_{utsläppsrätter} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = \frac{\dot{m}_{NG} \left[\frac{GJ}{s} \right] \cdot emissionsfaktor \left[\frac{ton}{GWh} \right] \cdot pris_{utsläppsrätter} \left[\frac{kr}{ton} \right]}{\dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}] + \left(\frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \cdot \dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}]}}$$

6.1.4 Intäkter för såld el

Den enda positiva posten i produktionskostnadsberäkningarna är den för såld el. Den producerade eleffekten multipliceras med aktuellt el- och elnätspris och därefter med 0,97 eftersom man räknar med en egenförbrukning på 3 %.

$$I_{el} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = 0.97 \cdot \frac{\left(pris_{el} \left[\frac{kr}{MWh} \right] + pris_{elnät} \left[\frac{kr}{MWh} \right] \right) \cdot \left(P_{GT} [MW] + P_{ST} [MW] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \right)}{\dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}] + \left(\frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \cdot \dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}]}}$$

6.1.5 Övriga poster

Underhållskostnaden för värmeproduktionen är uppskattad (av medarbetare på Västhamnsverket) till 4 kronor per megawattimme värme och för elproduktion till 4 kronor gånger alfa per megawattimme värme.

$$K_{underhåll} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = 4 \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] + 4 \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] \cdot \alpha$$

Den kanske mest komplicerade posten av alla är skattekostanden för egenförbrukad el för elproduktion där 1,5 % av den förbrukade naturgasen som används för elproduktion beskattas med full energi- och koldioxidskatt.

$$K_{skatt\ egenförbr.} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = 0.015 \cdot \frac{\left(\frac{\alpha}{1+\alpha} \right) \cdot \dot{m}_{NG} \left[\frac{MJ}{s} \right] \cdot \left(skatt_{CO_2} \left[\frac{kr}{kNm^3} \right] + skatt_{energi} \left[\frac{kr}{kNm^3} \right] \right)}{H_u \left[\frac{kWh}{Nm^3} \right] \cdot \left(\dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}] + \frac{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) \cdot \dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}]} \right)$$

6.2 Fastbränslepanna

För beräkning av produktionskostanden så används här tre huvudposter och en mindre post. De tre huvudposterna är bränslekostnad, intäkter för såld el samt intäkter för elcertifikat, den mindre posten står underhållskostnaden för. Kostnaden beräknas i enheten kronor per megawattimme värme.

$$K_{produktion} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = K_{pellets} - I_{el} - I_{elcert.} + K_{underh\ddot{a}ll}$$

På samma sätt som för gasturbinen baseras beräkningarna på ett antal parametrar som finns både uppmätta och predikterade vilket möjliggör en jämförelse av aktuell produktionskostnad med ”optimal” produktionskostnad. Några parametrar som används är massflöde pellets, värmeeffekt i fjärrvärmekondensorerna och eleffekt från ångturbinen.

6.2.1 Bränslekostnad

Massflödet pellets multipliceras med aktuellt pris samt divideras med den av fastbränslepannan genererade värmeeffekten, för att få kostnaden i enheten kronor per megawattimme värme. Nästan all värme genereras i fjärrvärmekondensorerna som matas med ånga via avtappningar från ångturbinen men det finns även en liten (ca 6 MW) fjärrvärmeeconomiser i rökgasstråket i pannan.

$$K_{pellets} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = \frac{\dot{m}_{pellets} \left[\frac{kg}{s} \right] \cdot H_u \left[\frac{MJ}{kg} \right] \cdot pris_{pellets} \left[\frac{kr}{MWh} \right]}{\dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) + \dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}]} \right)$$

6.2.2 Intäkter för såld el

El genereras bara på ett ställe och det är i generatoren kopplad till ångturbinen. Denna effekt multipliceras med en kvot, som anger hur mycket av ångan som kommer från fastbränslepannan, samt med aktuellt el- och nätpris. Egenförbrukningen är högre än för gasturbinen och uppskattas till 10 %, varför allt multipliceras med 0,9.

$$I_{el} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = 0.90 \cdot \frac{\left(pris_{el} \left[\frac{kr}{MWh} \right] + pris_{eln\ddot{a}t} \left[\frac{kr}{MWh} \right] \right) \cdot P_{ST} [MW] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right)}{\dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) + \dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}]}}$$

6.2.3 Intäkter för elcertifikat

Hur många elcertifikat som tilldelas baseras på den mängd el som produceras med förnyelsebart bränsle (pellets) varför den andel ånga som kommer från avgaspannan inte kan tas med i beräkningarna.

$$I_{elcert.} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = \frac{pris_{elcert.} \left[\frac{kr}{MWh} \right] \cdot P_{ST} [MW] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right)}{\dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) + \dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}]}}$$

6.2.4 Övriga poster

Underhållskostnaden för värmeproduktionen är uppskattad till 8 kronor per megawattimme värme och för elproduktion till 8 kronor gånger alfa per megawattimme värme.

$$K_{underh\ddot{a}ll} \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] = 8 \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] + 8 \left[\frac{kr}{MWh_{v\ddot{a}}} \right] \cdot \alpha$$

Där alfa beräknas enligt

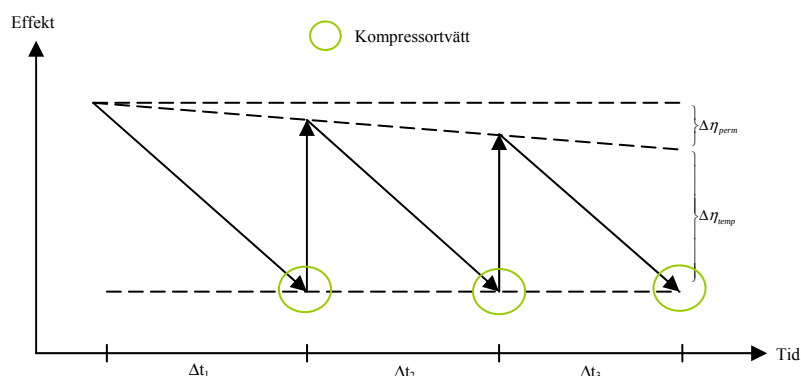
$$\alpha = \frac{P_{ST} [MW] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right)}{\dot{Q}_{kond} [MW_{v\ddot{a}}] \cdot \left(\frac{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right]}{\dot{m}_{S,Panna} \left[\frac{kg}{s} \right] + \dot{m}_{S,HRSG} \left[\frac{kg}{s} \right]} \right) + \dot{Q}_{eco} [MW_{v\ddot{a}}]}}$$

7 Ekonomisk optimering av kompressortvättstillfällen

Gasturbindegradering är oundviklig och orsakas dels av försmutsning men även av komponentförslitning. Gasturbindegradering orsakad av försmutsning är återhämtningsbar genom tvätt medan gasturbindegradering orsakad av komponentförslitning kräver utbyte av komponenter för att återställas. Försmutsning orsakas ofta av luftburna partiklar, t.ex. damm och pollen, som inte fångas upp av filtret utan till viss del ackumuleras på kompressorbeskovling och panntuber. Försmutsning av turbinbladen orsakas oftast när sotrikt bränsle används, d.v.s. inte naturgas som är fallet i Västhamnsverket. Kompressorförsmutsning orsakar försämrad gasturbinprestanda som vid fullast innebär lägre eleffekt vid (ungefärligt) bibehållen bränsleförbrukning. Vid dellast kan fortfarande samma eleffekt erhållas men då vid en högre specifik bränsleförbrukning. Sammanfattningsvis kan man säga att verkningsgraden, kvoten mellan eleffekt och förbrukad bränslemängd, sjunker med ökad försmutsningsgrad.

En kompressortvätt kan utföras antingen online, med gasturbinen i drift, eller offline där gasturbinen stoppas, kyls ner, tvättas och återstartas. En offline tvätt är dyrare på många sätt men resulterar också i en större effekttåterhämtning, samtidigt som risken för transport av smuts till kompressorns högtrycksdel och turbinens kylflutssystem minimeras.

Optimeringen går ut på att undersöka när i tiden (och om) en åtgärd skall sättas in för att återställa produktionsförmågan med hänsyn till den ökande degraderingen. Detta görs genom att väga intäktsökningen för återhämtat effekttapp mot kostnaderna för en offline tvätt. För att göra en sådan bedömning behövs bl.a. ett mått på hur en odegraderad gasturbin presterar vid rådande atmosfärstillstånd, väder- och elprisprognoser för den närmsta framtiden samt prisuppgifter för en offline tvätt. Figur 11 visar teoretiskt effekttapp vid degradering oberoende av variationer i atmosfärstillstånd. Degradering orsakad av komponentförslitning kan inte återhämtas vid tvätt varför den maximalt uttagbara effekten (nästöversta streckade linjen) minskar med tiden. I figuren sker alla kompressortvättar vid samma undre effekt utan hänsyn till om det är ekonomiskt fördelaktigt. Genom att ta hänsyn till fler parametrar, än enbart aktuell degraderingsgrad, så kan tidpunkterna för kompressortvätt optimeras.



Figur 11. Gasturbindegradering

Figure 11. Gas turbine degradation

Optimeringen grundar sig på en jämförelse av verklig gasturbinprestanda och av ANN predikterad gasturbinprestanda. Eftersom data som använts för att träna ANN modellen är insamlad efter en s.k. baseline (baseline i detta fall var en kompressortvätt samt inspektion av skovlar) så representerar prediktionerna från modellen en odegraderad maskin. För att möjliggöra optimeringen måste en degraderingstrend beräknas.

7.1 Beräkning av degraderingstrend

Beräkning av degraderingstrenden kommer, för enkelhetens skull, enbart att baseras på fullastdrift av gasturbinen. Bränsleförbrukningen har här antagits oförändrad vid ökad degraderingsgrad samtidigt som eleffekten (och därmed verkningsgraden) sjunker.

För att bli av med eleffektens beroende av atmosfärstillståndsvariationer så har den räknats om till ISO standard (1,013 bar och 15°C). Atmosfärstryckskorrektion görs enkelt genom att multiplicera aktuell eleffekt med ISO atmosfärstryck och dividera med aktuellt atmosfärstryck (se ekvation nedan). För att göra en temperaturkorrektion så multipliceras aktuell eleffekt med en faktor som varierar med atmosfärstemperaturen (vid 15° är temperaturkorrektionsfaktorn 1,00). Temperaturkorrektionsfaktorerna har tagits fram med hjälp av syntetisk data genererad av Siemens designverktyg GT21. Tabell 14 visar temperaturkorrektionsfaktorer vid varierande atmosfärstemperatur.

$$P_{ISO}[MW] = P_{aktuell}[MW] \cdot \frac{p_{ISO}[bar]}{p_{atmosfär}[bar]} \cdot k_{temperatur}$$

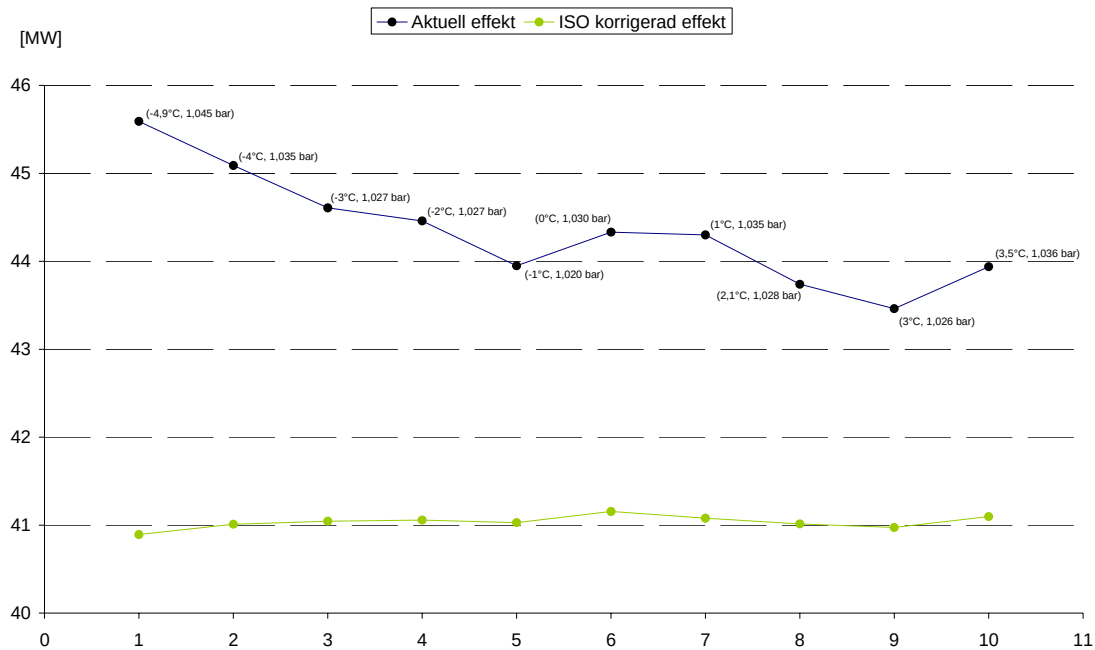
Tabell 14. Temperaturkorrektionsfaktorer vid varierande atmosfärstemperatur

Table 14. Correction factors for varying ambient temperatures

Atmosfärstemperatur	Korrektionsfaktor
-15	0,89
-10	0,91
-5	0,92
0	0,94
5	0,96
10	0,98
15	1,00
20	1,03
25	1,07
30	1,10

För att bekräfta metoden har 10 datapunkter vid varierande atmosfärstillstånd slumpmässigt valts ut och korrigerats till ISO standard enligt Figur 12. Ingen korrektion görs med hänsyn till den relativa fuktigheten då denna anses, jämfört med atmosfärstryck och temperatur, ha väldigt liten påverkan på gasturbinprestandan. Datapunkterna representerar en odegraderad maskin och är insamlade vid fullast utan anti icing i drift. Som förväntat bildar de ISO korrigerade punkterna en relativt rät linje.

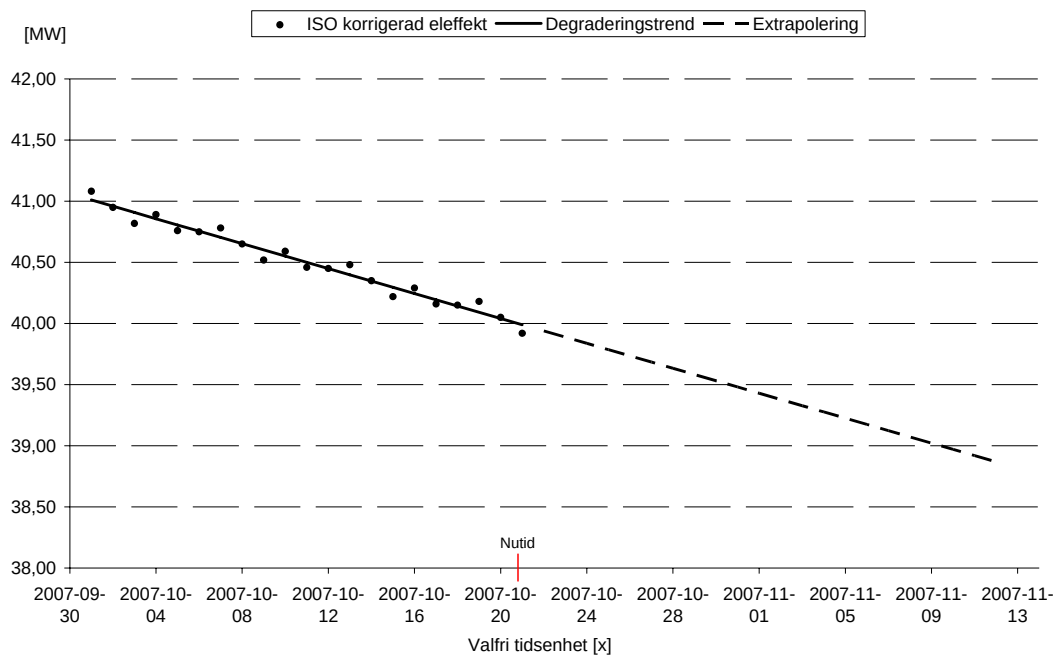
Vid degradering kommer trenden för den ISO korrigerade eleffekten att vara nedåtgående.



Figur 12. Eleffekt korrigerad till ISO standard (15°C och 1,013 bar)

Figure 12. ISO corrected electric power (15°C and 1,013 bar)

Baserat på den ISO korrigerade eleffekten beräknas en degraderingstrend med linjär regression under antagandet att degraderingen är just linjär i tiden. Med linjär extrapolering fås därefter eleffekten vid önskad tidpunkt i framtiden. Tillvägagångssättet illustreras i Figur 13. Eleffekten kan sen konverteras tillbaks från ISO standard till gällande atmosfärstillstånd.



Figur 13. Bestämning av degraderingstrend

Figure 13. Determination of degradation trend

7.2 Prognostisering

Med mått på hur både en odegraderad maskin och en degraderad maskin presterar kan skillnaden i nutid enkelt beräknas eftersom aktuella förutsättningar är kända. Ska framtida skillnader beräknas måste prediktioner baseras på antingen väderprognoser eller väderstatistik samtidigt som den extrapolerade ISO effekten måste korrigeras med desamma. För den närmsta framtiden kan det antas att prognoser finns tillgängliga, medan beräkningar längre fram i tiden förslagsvis baseras på statistiska värden. För att sedan värdera skillnaden ekonomiskt behövs även prognoser för elprisutvecklingen de kommande dagarna. Punktlistan nedan beskriver nödvändiga uppgifter för en optimering av kompressortvättstillfällen.

- Elprisprognos för den närmsta framtiden
- Medelvärde elpris, baserat på tillgänglig elprisprognos
- Väderprognos för den närmsta framtiden
- Väderstatistik med dygnsmedeltemperaturer för aktuella perioder
- Prisuppgifter på kompressortvätt
- Tidsåtgång för kompressortvätt

Med predikterad och framräknad framtida gasturbinprestanda, för odegraderad samt degraderad maskin, tillsammans med en elprisprognos kan kostnaden för kompressortvätt samt intäktsökningen för återhämtat effekttapp beräknas. Metodiken går ut på att beräkna, för alla dagar som innefattas av prognoserna, hur många dagar det tar att tjäna igen en kompressortvätt med genererad intäktsökning. Prisuppgifter på en

kompressortvätt, samt den tid det tar att utföra kompressortvätten, måste självklart också vägas in i ekvationen. En rimlig uppskattning är att väder- och elprisprognoserna sträcker sig sju dagar framåt (se Tabell 15 där dag ett är ”imorgon”). För de dagar väderprognos finns tillgänglig baseras eleffekts prediktioner samt extrapolerade värden på dessa, längre fram övergår eleffekten till att baseras på statistiska värden. Det samma gäller för intäktsberäkningarna som först baseras på elprisprognosen för att sedan gå över till att baseras på ett medelvärde av prognosen.

Tabell 15. Prognoser och statistik

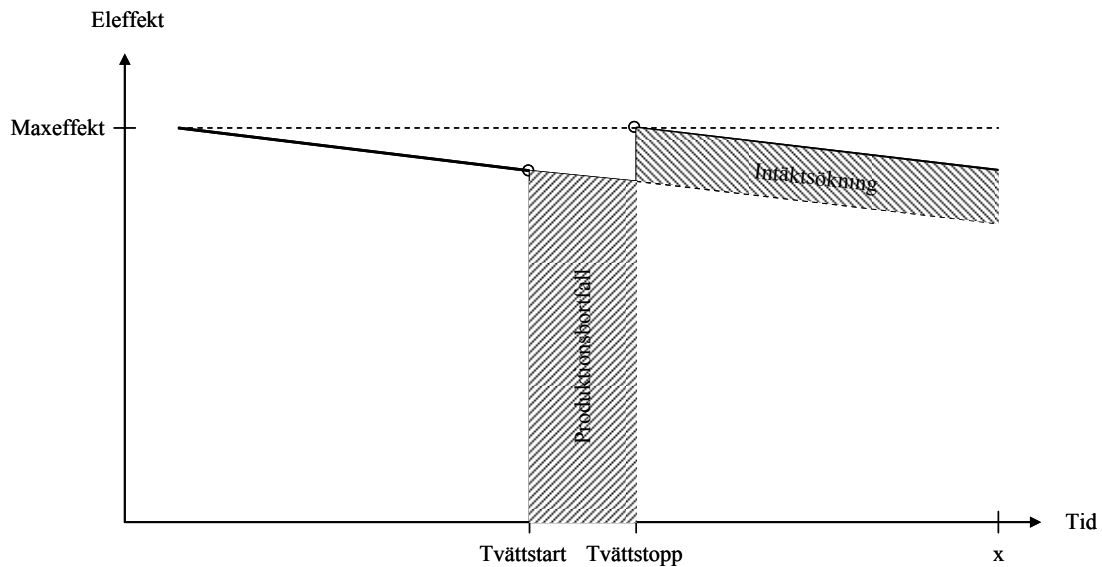
Table 15. Forecasts and statistics

Dag	Elprisprognos	Väderprognos	Medelvärde elpris	Väderstatistik
1	x	x		
2	x	x		
3	x	x		
4	x	x		
5	x	x		
6	x	x		
7	x	x		
8,9,..			x	x

Eftersom bränsleförbrukningen är antagen oberoende av degraderingsgraden så kommer den vara samma för en odegraderad maskin som en degraderad maskin. ANN kan därför användas för att prediktera bränsleförbrukningen för olika tidpunkter baserat på väderprognosen. En annan fördel med detta antagande blir att enbart hänsyn till skillnader i eleffekt behöver tas för att beräkna inkomstökningen vid kompressortvätt eftersom kostnaderna förblir desamma. För dag ett till sju gäller att lösa ut x, som representerar hur många dagar det tar att tjäna igen en kompressortvätt, ur ekvationen nedan. Index i beskriver aktuell dag, där dag ett är dagen för kompressortvätt. Den första posten är den fasta kostnaden för utförandet av kompressortvätt, andra posten intäktsbortfallet under kompressortvätten och tredje posten kostnadsbesparingen under kompressortvätten. Den sista posten anger, per dag, hur stor intäktsökning som genereras av en kompressortvätt från dagen efter tvätten och framåt.

$$0 = -K_{tvätt} - (P_1^{extrapolerad} \cdot t_{tvätt} \cdot elpris_1) + (\dot{m}_{NG,1}^{ANN} \cdot t_{tvätt} \cdot (pris_{NG} + skatt_{CO_2} + pris_{utsläppsrätter})) + \sum_{i=2}^x (((P_i^{ANN} - k_{degraderingstrend} \cdot i) - P_i^{extrapolerad}) \cdot elpris_i \cdot 24)$$

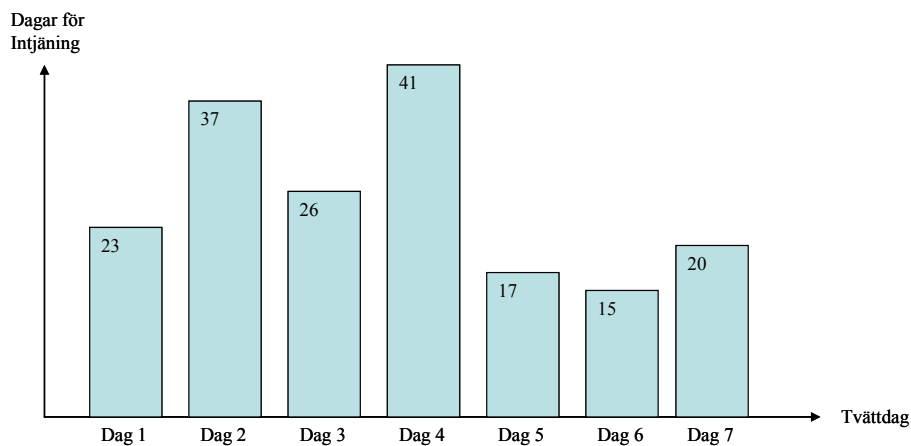
Konstanten k, i ekvationen, används för att korrigera ANN prediktioner enligt framräknad degraderingstrend. Hela metoden illustreras i Figur 14 där x (samma som i ekvationen) representerar den dag då intäktsökningen är lika stor som intäktsbortfallet, minus utgiftsbesparingarna, under kompressortvätten.



Figur 14. Intäktsökning och produktionsbortfall vid kompressortvätt

Figure 14. Increase of income and production loss associated with a compressor wash

Resultatet av optimeringsberäkningarna visas i ett stapeldiagram (se exempel i Figur 15) som anger, för respektive tvättdag, hur många dagar det tar att tjäna in en kompressortvätt. Optimeringsberäkningar utförs en gång dagligen varpå stapeldiagrammet uppdateras. Eftersom beräkningarna i hög grad beror av prognoser så kan resultatet endast anses som en fingervisning som pekar på vilken eller vilka dagar som kan vara mer fördelaktiga för kompressortvätt än andra.



Figur 15. Antal dagar för intjäning av kompressortvätt (exempel)

Figure 15. Number of days to break even after compressor wash (example)

En faktor som inte togs med i beräkningarna är degradering som inte är återhämtbar genom kompressortvätt, d.v.s. komponentförslitning. För att ta hänsyn till denna kan antingen en trend beräknas även här men enklare är att efter varje tvätt korrigera

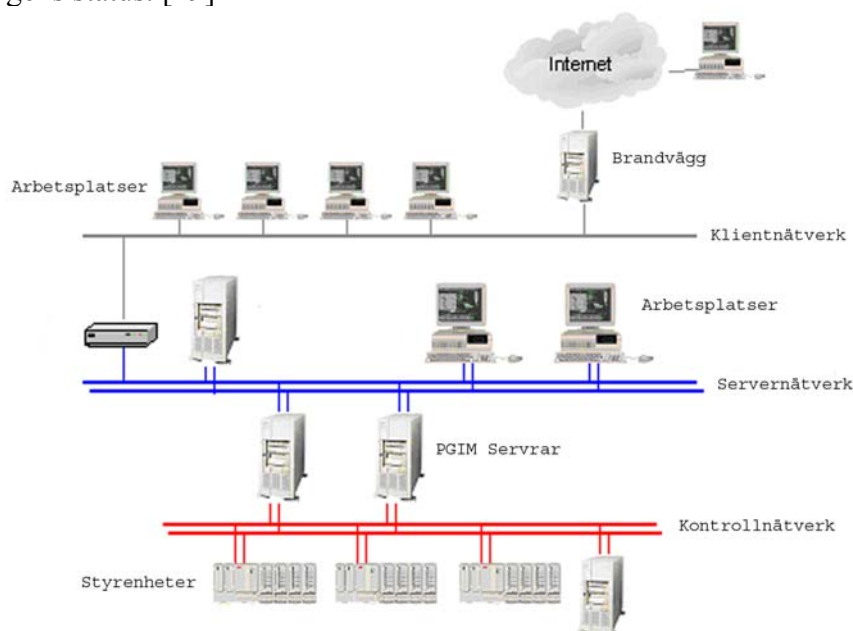
prediktionerna för maximalt effektuttag. Andra faktorer som bör övervägas vid bedömning om en kompressortvätt ska utföras är helgdagars inverkan, hur många dagar i förväg en tvätt måste beställas, samt om det finns andra planerade driftstopp då en kompressortvätt kan utföras.

8 Integrering och användning av onlinesystem på Västhamnsverket

ANN modellerna finns integrerade i Excel som funktioner bestående av visual basic kod. Aktuell (eller historisk) mätdata hämtas från Västhamnsverket databasserver, PGIM (Power Generation Information Manager), och används som indata till ANN modellerna varpå utdata från ANN modellerna återlagras i "soft-points" på PGIM servern. Tack vare återlagring av prediktioner i databasen, tillsammans med driftdata, så finns alltid historiska prediktioner tillgängliga. Samlingsnamn för det system som används på Västhamnsverket för kontroll, övervakning, datalagring och analys heter 800xA och beskrivs i kapitel 8.1.

8.1 System 800xA

800xA består av datorer och PLC¹:er som kommunicerar över olika (ethernetbaserade) nätverk, vilket förenklat illustreras i Figur 16. Arbetsplatserna kopplade till klient- och servernätverket representerar datorer som används i kontrollrummet, av driftledningen eller i instrumentverkstaden. En PGIM server tar emot data från anläggningen och lagrar signalbeskrivningar, aktuella och historiska värden samt larm och händelser i sju år. Genom 800xA användargränssnittet har användaren tillgång till processdata från anläggningen, både aktuell och historisk, samt funktioner för att utvärdera anläggningens status. [19]



Figur 16. Konceptuell nätverkskommunikationsuppbyggnad i 800xA [19]

Figure 16. Conceptual structure of 800xA communication network

¹ Programmable Logic Controller

ANN modellerna är installerade på en PGIM server och körs kontinuerligt i bakgrunden för att hela tiden generera prediktioner för återlagring. Eftersom alla prediktioner lagras på PGIM servern är de direkt tillgängliga från vilken arbetsstation som helst, dels genom 800xAs användargränssnitt, men även genom det framtagna Excel användargränssnittet som beskrivs i kapitel 8.2.

8.2 Användargränssnitt Excel

Användargränssnittet i Excel är framtaget för att vara lättöverskådligt och lättanvänt. Det är uppdelat på fem flikar i ett Exceldokument. Den första fliken visar en översikt över hela hybridanläggningen med huvudparametrar för respektive delsystem samt en ekonomidel med produktionskostnaden för de två produktionssätten, gasturbin och fastbränslepanna. Här finns också information om indata till systemet, både termodynamisk och ekonomisk. Övriga flikar innehåller information om respektive delsystem, d.v.s. gasturbin, ångturbin, avgaspanna och fastbränslepanna. ANN prediktionerna presenteras hela tiden under sin uppmätta motsvarighet vilket möjliggör analys av anläggningsprestanda. Den första fliken, kallad Översikt, visas i Figur 17 och är en "screenshot" direkt från en arbetsstation på Västhamnsverket (vilket är generellt för alla bilder i kapitel 8.2). Generellt i kapitel 8.2 gäller även att bilderna är genererade vid användning av historisk driftdata eftersom anläggningen inte var i drift vid insamlingstillfället (september 2007). Dock bör påpekas att det inte är någon skillnad vid användning av historisk data jämfört med aktuell data då båda hämtas från PGIM servern.

2006-02-01 00:55

Indata till systemet	
Last GT [1 Full, 0 30MW]	1
Anti Icing [1 På, 0 Av]	1
Atmosfärstemperatur [°C]	1.50
Atmosfärstryck [mbar]	103.34
Fjärrvärmepump fram [°C]	95.51
Fjärrvärmepump retur [°C]	48.05
Gaspris [kr/MWh]	200
Gasnat [kr/MWh]	35
Elpris [kr/MWh]	350
Elnat [kr/MWh]	20
CO ₂ skatt [kr/kNm ³]	1994
Energiskatt [kr/kNm ³]	243
Utsläppsrätter [kr/ton]	250
Pellets [kr/MWh]	225
Elcertifikat [kr/MWh]	205

Gasturbin	
T7 [°C]	549.94 549.97
Massflöde NG [MJ/s]	124.70 124.88
Effekt [MW]	43.23 43.29

Avgaspanna	
Ångtemp [°C]	532.90 532.90
Ångflöde [kg/s]	15.71 15.70
Värmeffekt [MW]	20.18 20.29

Ekonomi GT [kr/MWh,]	
Naturgas	637 636
CO ₂ Skatt	46 46
Utsläppsrätter	138 138
Intäkter EI	438 436
Total prod. kostnad	396 396

Biopanna	
Massflöde pellets [kg/s]	12.78 12.83
Ångtemp [°C]	529.09 528.51
Ångflöde [kg/s]	83.18 83.64

Ångturbin	
Effekt [MW]	81.55 81.43
Matarvattentemp [°C]	236.33 236.05
Värmeffekt [MW]	162.57 163.85

Ekonomi Panna [kr/MWh,]	
Pellets	340 343
Intäkter EI	158 158
Intäkter Elcertifikat	97 97
Total prod. kostnad	98 99

Avvikelse börv.	
Varning	0
Larm	0

Parameteranalys	
Skapa kurva	

Figur 17. Användargränssnitt i Excel, Översikt

Figure 17. User Interface in Excel, Main View

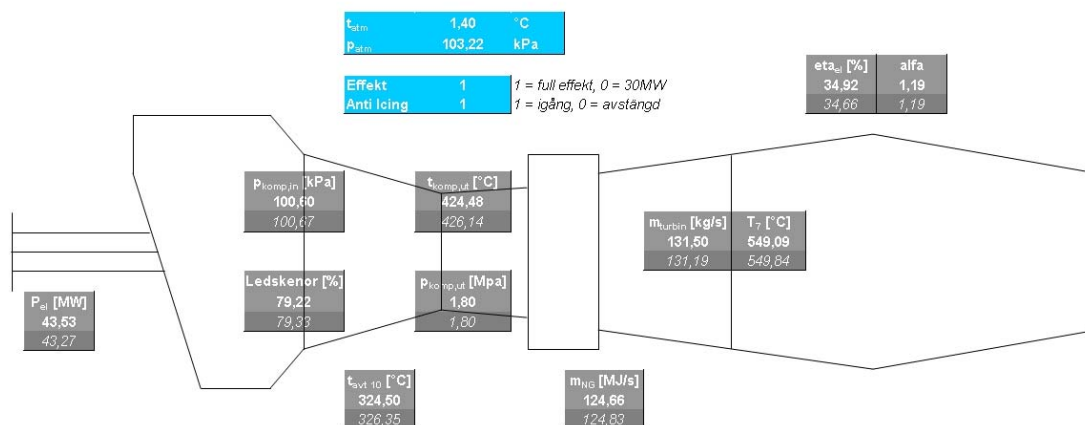
Uppdateringsfrekvensen för användargränssnittet kan anpassas efter användarens behov och vid varje uppdateringstillfälle hämtas senaste data från PGIM servern. Inbyggda funktioner för varning och larm vid eventuella avvikelser, samt ett verktyg för parameteranalys finns integrerat i användargränssnittet och beskrivs i kapitel 8.2.5 och 8.2.6.

Ekonomisk indata matas in för hand av användaren, förutom elpris som uppdateras automatiskt med data från Nordpool. Av de ekonomiska indata är elpriset den med snabbast svängningar och anses därför inte lämplig att matas in för hand. Skatter, bränslepriser, nätkostnader, elcertifikat och utsläppsrätter förhåller sig relativt konstant och kräver därmed ingen högfrekvent uppdatering av användaren.

Användningsområdet för detta onlineverktyg är framförallt konditionsövervakning, termoeconomisk analys samt optimering av kompressortvättstillfälle². Med konditionsövervakning menas att driftdata hela tiden jämförs med baseline baserade ANN prediktioner för att avgöra (och varna) om anläggningen är degraderad eller vid ett eventuellt fel. Så länge inga varningar eller larm förekommer så kan anläggningen antas vara odegraderad. Med den termoeconomiska analysen, där kostnader och intäkter beräknas, kan ickeoptimal drift utvärderas och ge direkt mått på förlorade intäkter eller kostnadsökning för produktionen. Alla ekvationer som används för den termoeconomiska analysen beskrivs i kapitel 6.

8.2.1 Gasturbin, SGT800

Den del av användargränssnittet som representerar gasturbinen finns under en separat flik i Excel, se Figur 18, med samma in- och utdata som presenterades i Tabell 2. Utöver dessa utdata så beräknas också elverkningsgraden, genom eleffekten och bränsleflödet, samt alfa enligt ekvation i kapitel 6.1.2. Även dessa beräknade parametrar finns i dubbel uppsättning, där den översta är beräknad på uppmätt data och den undre på prediktioner.



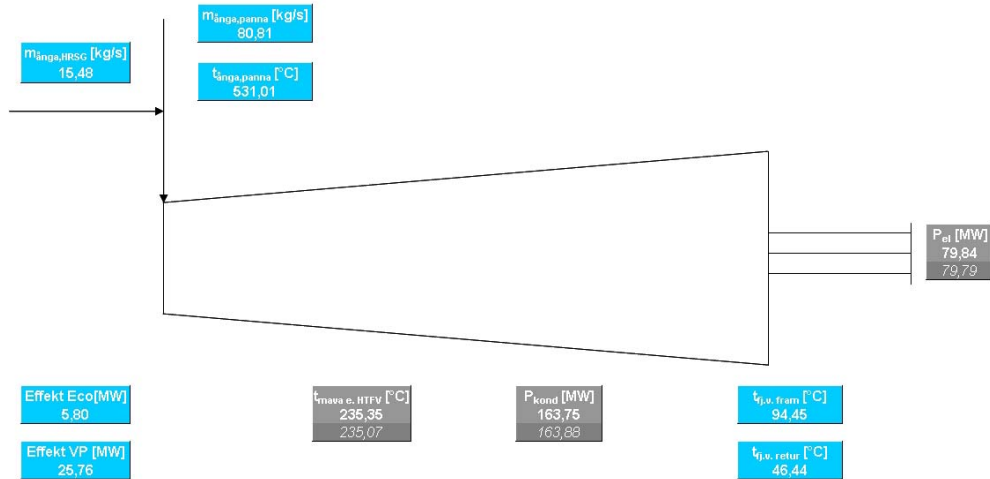
Figur 18. Användargränssnitt i Excel, Gasturbin

Figure 18. User interface in Excel, Gas turbine

² I skrivande stund är inte modulen för optimering av kompressortvätt integrerad i användargränssnittet

8.2.2 Ångturbin, ATM

På samma sätt som gasturbinen är även ångturbinen representerad med en egen flik i Excel (se Figur 19). In- och utdata är samma som presenterats tidigare i Tabell 4.

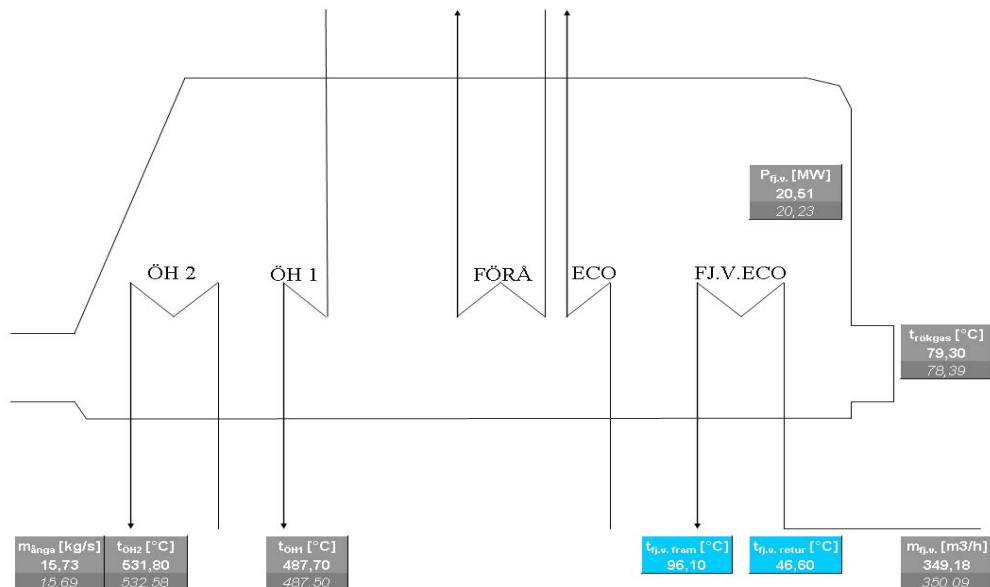


Figur 19. Användargränssnitt i Excel, Ångturbin

Figure 19. User interface in Excel, Steam turbine

8.2.3 Avgaspanna

ANN modellen för avgaspannan beskrevs i kapitel 4.3 och samma in- och utdata parametrar återkommer i användargränssnittet enligt Figur 20. De indataparametrar som är gemensamma med gasturbinmodellen har dock utelämnats här.

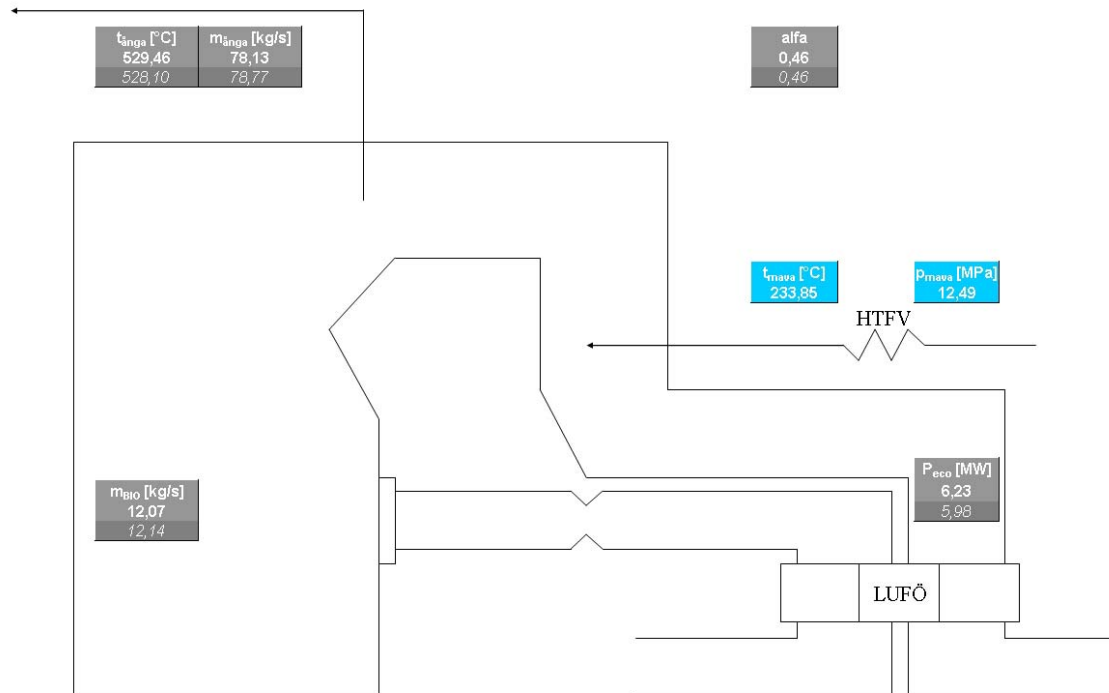


Figur 20. Användargränssnitt i Excel, Avgaspanna

Figure 20. User interface in Excel, HRSG

8.2.4 Fastbränslepanna

På samma sätt, som de andra delsystemen, presenteras även fastbränslepannan under en separat Excel flik enligt Figur 21. Alfa beräknas enligt ekvation i kapitel 6.2.4.



Figur 21. Användargränssnitt i Excel, fastbränslepanna

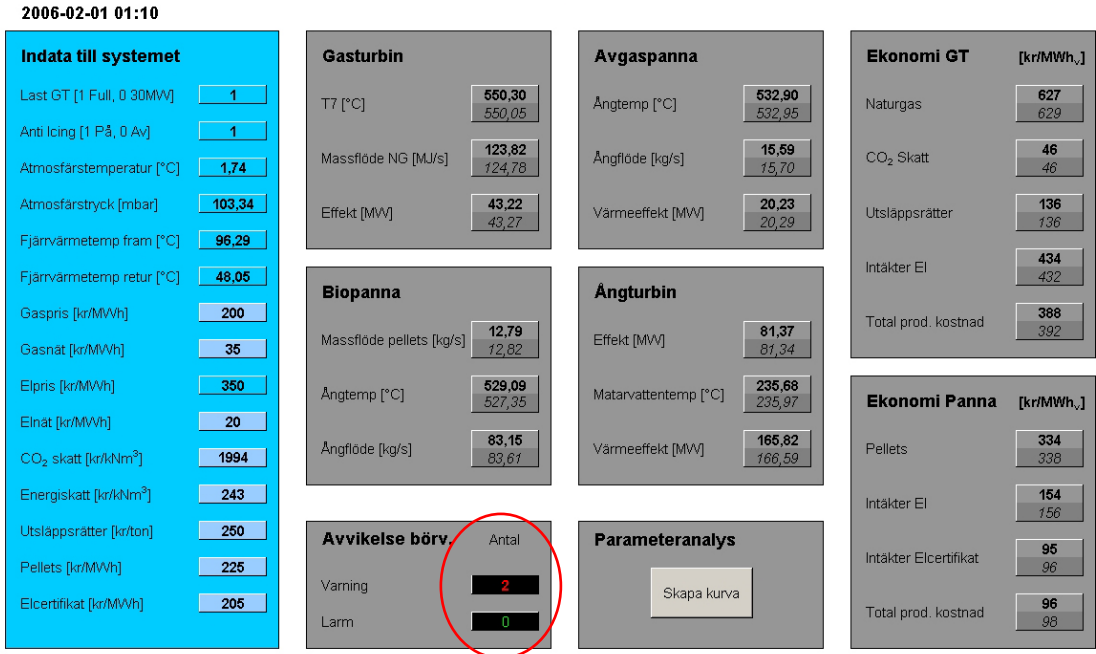
Figure 21. User interface in Excel, solid fuel boiler

8.2.5 Varning/Larm vid avvikelse

För att göra användaren uppmärksam på eventuella avvikelser mellan uppmätt data och predikterad så finns en varnings- och larmindikator, markerad med en röd cirkel i Figur 22. Varnings- och larmgränser är individuellt fördefinierade och bestäms utifrån respektive parameters beskaftenheter, t.ex. spelar mät- och prediktionsnoggrannhet in men även användarens önskemål. Varje gång ny data hämtas från PGIM servern, och ny utdata predikteras av ANN modellerna, så utförs en automatisk jämförelse av respektive parameters uppmätta och predikterade värde. Om den aktuella differensen för en parameter överskrider sin larm- eller varningsgräns så meddelas användaren.

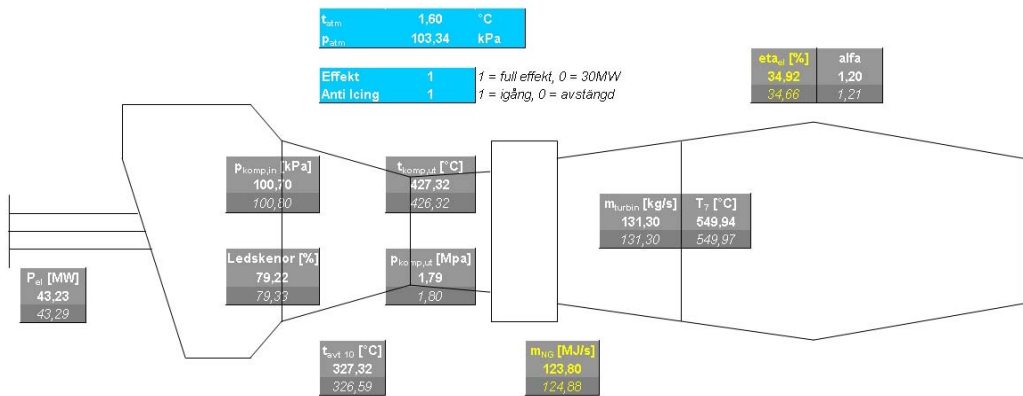
För att generera Figur 22 (samt Figur 23 och Figur 24) sänktes varningsgränsen för gasturbinparametrarna till 0,5 % och larmgränsen till 1 %. För att sedan lokalisera vilken/vilka parametrar som avviker så används gul färg för varning respektive röd färg för larm. I Figur 23 visas två varningar, en för massflöde naturgas samt en för verkningsgraden. Verkningsgraden är en direkt funktion av naturgasflödet och det

förefaller sig naturligt att om en varning uppstår för den ena så är chansen stor att det även gör så för den andra. I Figur 24 har varningen för naturgasflödet övergått i ett larm samt ytterligare en varning, för alfa, har uppkommit.



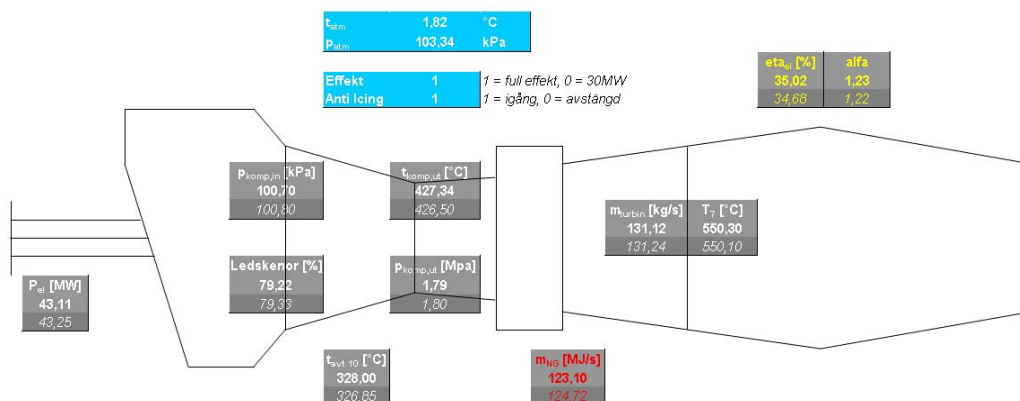
Figur 22. Översikt, två varningar

Figure 22. Main view, two warnings



Figur 23. Gasturbin, två varningar

Figure 23. Gas turbine, two warnings



Figur 24. Gasturbin, ett larm och två varningar

Figure 24. Gas turbine, one alarm and two warnings

8.2.6 Parameteranalys

Verktyget för parameteranalys är utvecklat tillsammans med medarbetare på Västhamnsverket och är sofistikerat på det viset att det låter användaren, med några enkla klick, välja vilken parameter som önskas analyseras samt under vilken tidsperiod detta ska göras. Vid tryck på knappen ”Skapa kurva”, inringat i rött, kommer fönstret ”Välj signal för trend” upp där de olika valen görs (se Figur 25).

2006-02-01 14:55

Indata till systemet

Last GT [1 Full, 0 30MW] **1**

Anti Icing [1 PÅ, 0 Av] **1**

Atmosfärstemperatur [°C] **1.48**

Atmosfärstryck [mbar] **103.22**

Fjärrvärmes fram [°C] **94.79**

Fjärrvärmes retur [°C] **46.44**

Gaspris [kr/MWh] **200**

Gasnat [kr/MWh] **35**

Elpris [kr/MWh] **350**

Elnät [kr/MWh] **20**

CO₂ skatt [kr/kNm³] **1994**

Energiskatt [kr/kNm³] **243**

Utsläppsrätter [kr/ton] **250**

Pellets [kr/MWh] **225**

Elcertifikat [kr/MWh] **205**

Gasturbin

T7 [°C] **549.30**
549.89

Massflöde NG [MJ/s] **124.82**
124.77

Effekt [MW] **43.27**
43.26

Avgaspanna

Ångtemp [°C] **532.70**
532.49

Ångflöde [kg/s] **15.67**
15.70

Värmeffekt [MW] **20.13**
20.23

Ekonomi GT [kr/MWh_e]

Naturgas **620**
618

CO₂ Skatt **45**
45

Utsläppsrätter **134**
134

Intakter EI **427**
426

Total prod. kostnad **386**
384

Ekonomi Panna [kr/MWh_e]

Pellets **332**
328

Intakter EI **154**
152

Intakter Elcertifikat **95**
94

Total prod. kostnad **95**
94

Välj signal för trend

Signal: Tryck kompressor inlopp

Starttid: 2007-10-10 09:47:55

Sluttid: 2007-10-17 09:47:55

Avbryt Skapa trendkurva

Avvikelse börj. Antal

Varning **0**

Larm **0**

Parameteranalys

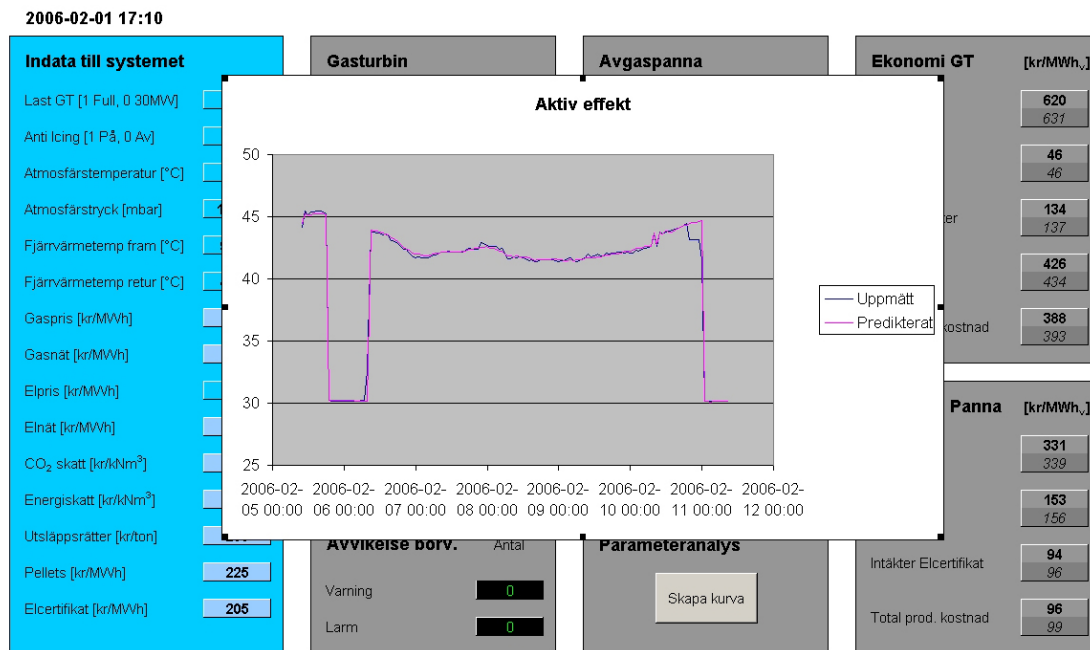
Skapa kurva

Figur 25. Parameteranalys

Figure 25. Parameter analysis

Önskad parameter väljs i en rullgardinsmeny och för demonstrationssyfte väljs eleffekten från gasturbinen samt en period på ungefär en vecka. En plot genereras

automatiskt, se Figur 26, och visar uppmätt data tillsammans med predikterad för vald period och parameter. Denna funktion möjliggörs tack vare att all historisk data, uppmätt och predikterad, finns lagrad på PGIM servern och är tillgänglig från alla arbetsstationer kopplade till klient- och servernätverket.



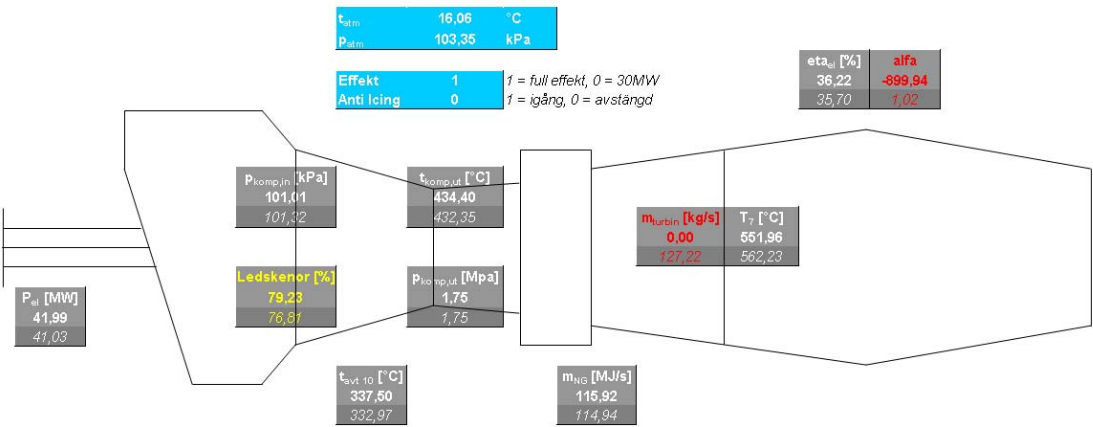
Figur 26. Trend, uppmätt och predikterat

Figure 26. Trend, measured and predicted

8.3 Onlinetest av gasturbin ANN

Den 17e september 2007 testkördes gasturbinen efter en stor service med bl.a. brännkamarbyte. Detta gav upphov till möjligheten att testa/utvärdera ANN modellen med helt ny driftdata, genererad långt efter träningsdata (februari 2006). Atmosfärstemperaturen på 16°C är långt utanför det normala driftsfönstret, men också långt utanför träningsintervallet på -5 till +5 °C vilket även testar ANN modellens extrapoleringsförmåga. Resultatet syns i Figur 27 och visar att ANN modellen, trots svåra förutsättningar, predikterar utdata med relativt bra resultat. De två parametrar som har larm (röda) får bortses ifrån eftersom ingen signal erhöles för turbinens massflöde samtidigt som ingen värmeproduktion förekom. Varningsgränsen var satt till 2 % och larmgränsen till 4 % vilket betyder att alla parametrar utom ledskenornas läge predikteras med ett fel på mindre än 2 %. Anledningen till att just denna parameter predikteras med lite högre fel än resterande kan vara dess speciella karakteristik, d.v.s. konstant vid fullast oavsett atmosfärstillstånd. Om träningsdata hade innefattat temperaturer i detta intervall så hade problemet undvikits men eftersom gasturbinens driftfönster begränsas långt innan så höga temperaturer så undviks problemet oavsett. Intressant att notera är även att eleffekten predikteras lite lägre än den verkliga samtidigt som turbinutloppstemperaturen predikteras lite högre. Detta kan tolkas som

att Siemens lyckades med sin service och mer av den eldade effekten i brännkammaren omvandlas till eleffekt jämfört före service.



Figur 27. Onlinetest av gasturbin ANN

Figure 27. Online test of the gas turbine ANN

Slutsatsen av testet bör bli att ANN modellens extrapoleringsförmåga är mycket bra men omträning eller kalibrering kan behövas eftersom gasturbinprestandan förmodligen har förändrats efter service. Ett beslut om omträning eller kalibrering bör dock baseras på en jämförelse av prediktioner och driftdata inom det normala driftsfönstret. Vidare bör nämnas att integrering av en nytränad ANN modell med samma in- och utdatastruktur som befintlig är ett mycket enkelt ingrepp, det som behövs är ny driftdata till omträning.

9 Resultatredovisning

Noggrannheten för de, sedan förra projektet, uppdaterade ANN modellerna redovisas i Tabell 16 och Tabell 17.

Tabell 16. Felfördelning vid prediktion av utdata med ångturbin ANN

Table 16. Error distribution for prediction of outputs with the steam turbine ANN

Felfördelning	<1%	1-2%	2-4%	>4%
Eleffekt	2795	94	10	1
Temperatur matarvatten efter HTFV	2900	0	0	0
Effekt fjärrvärmekondensorer	1655	736	354	155

Tabell 17. Felfördelning vid prediktion av utdata med fastbränslepanna ANN

Table 17. Error distribution for prediction of outputs with the solid fuel boiler ANN

Felfördelning	<1%	1-2%	2-4%	>4%
Massflöde ånga	2628	229	25	18
Temperatur ånga	2332	517	51	0
Massflöde pellets	2462	400	30	8
Värmeeffekt rökgasekonomiser	157	168	389	2186

Övriga resultat:

- ANN modeller installerade på PGIM server i Västhamnsverkets datasystem
- Användargränssnitt i Excel utvecklat, implementerat och testat på Västhamnsverket
- Ekonomiska beräkningar kopplade till ANN modeller för termoeconomisk analys/optimering
- Varnings- och larmindikator integrerad i användargränssnittet
- Verktyg för parameteranalys integrerad i användargränssnittet
- Metod för optimering av kompresstvätsintervall framtagna

10 Resultatanalys

ANN modellerna har uppdaterats med avseende på utdata för att inkludera parametrar som är önskvärda vid en termoeconomisk analys. Detta gjordes framgångsfullt och alla parametrar utom en, värmeeffekt rökgasekonomiser, predikteras med hög noggrannhet. Denna parameter är dock förhållandevis betydelselös, på grund av sin ringa storlek jämfört med värmeeffekten i fjärrvärmekondensatorerna, och påverkar därför inte den efterföljande termoeconomiska analysen.

Arbetet med integrering av ANN modeller i Västhamnsverkets datasystem fortlöpte smärtfritt. Användargränssnittet i Excel, som är framtaget tillsammans med medarbetare på Västhamnsverket, är både implementerat och testat med bra resultat. De, i användargränssnittet, inbyggda funktionerna har visat sig mycket användbara samtidigt som de är enkla att använda.

De ekonomiska beräkningarna, för den ekonomiska analysen/driftoptimeringen, utförs med bra resultat mycket tack vare ANN modellernas höga prediktionsnoggrannhet.

Metoden för ekonomisk optimering av kompressortvättstillfällen är i skrivande stund inte implementerad i användargränssnittet och därför heller inte testad. En faktor som kommer att försvåra utvärderingen av denna metod är de få drifttimmar, och därmed måttliga försmutsning, gasturbinen på Västhamnsverket får varje år. Användning av verktyget kräver också att både väder- och elprisprognoser finns tillgängliga i Västhamnsverkets datasystem.

11 Slutsatser

Resultaten visar bland annat att:

- ANN modellering av hybridanläggningens delsystem kan göras med hög noggrannhet.
- ANN modeller kan implementeras i värmekraftverkets datasystem för att online prediktera anläggningens prestanda.
- Prediktioner från ANN modellerna finns tillgängliga genom alla arbetsstationer kopplade till PGIM servern via antingen Excel användargränssnittet eller 800xA användargränssnittet.
- Användargränssnittet i Excel kan användas för tillståndsovervakning och termoeconomisk optimering.

Framtagna ANN modeller är specialutvecklade för hybridanläggningen vid Västhamnsverket och kan därför inte användas på andra kraftvärmeverk. Däremot är metoden/arbetsgången för framtagning av ANN modeller, användargränssnitt mm. generaliserbar.

12 Diskussion

Att använda sig av ANN modellering i kraftverkssammanhang är en relativt ny företeelse. ANN "tävlar" mot traditionella ekvationsbaserade program/system baserade på bl.a. värme- och massbalanser. Fördelarna med ANN är bland annat att:

- Samband som är svåra att uttrycka fysikaliskt modelleras i ANN genom detektering av statistiska samband mellan in- och utdata.
- Modelleringsarbetet går relativt snabbt, förutsatt att detaljerad kunskap om systemets funktionssätt finns hos modelleraren.
- Slutprodukten är väldigt lättanvänd med korta beräkningstider.
- Slutprodukten kan implementeras i valfri programmiljö, till exempel Microsoft Excel.
- ANN kan kombineras med fysikaliska modeller.

Nackdelar med ANN jämfört traditionella ekvationsbaserade program/system är bland annat att:

- Tillgång till mätdata vid varierande driftstillstånd är en förutsättning för ANN modellering.
- Kunskaper om ANN, ANN modellering och datafiltrering är nödvändig för modelleringsarbete.

13 Rekommendationer och användning

Det framtagna verktyget för tillståndsovervakning och termoekonomisk optimering av driften kan användas av kraftverksägaren för att effektivisera underhållet av anläggningen genom övergång till så kallat konditionsbaserat underhåll.

14 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Som fortsättning på detta arbete föreslås fortsatt fokusering på implementeringen och användningen av ANN modellerna, för online tillståndsovervakning och termoeconomisk driftoptimering, samt en utvärdering av användbarheten. Användargränssnittet kan vidareutvecklas genom att till exempel automatisera uppdateringen av alla ekonomiska indata och eventuellt överförs till 800xA miljö.

Vidare forskning bör också utföras inom andra användningsområden, så som sensorvalidering, vibrationsövervakning, avgastemperaturprofilmodellering och feldiagnostisering.

15 Litteraturreferenser

- [1] Torisson T., Assadi M., "Utvärdering av gasturbin GTX100 i Helsingborg - Etapp 1", SGC Rapport A31, 2001
- [2] Karlsson A., "Utvärdering av gasturbin GTX100 i Helsingborg - Etapp 2", SGC Rapport A39, 2003
- [3] Torisson T., Assadi M., Klingmann J., Arriagada J., Genrup M., Karlsson A., "Utvärdering av gasturbin GTX100 i Helsingborg - Etapp 3", SGC Rapport 154, 2005
- [4] Fast M., Assadi M., "Modellering av hybridanläggning samt utveckling av övervakningssystem för Västhamnsverket baserat på Artificiella Neurala Nätverk", SGC Rapport 171, 2006
- [5] Arriagada J., "Introduction of Intelligent Tools for Gas Turbine Based, Small-Scale Cogeneration", Licentiatavhandling, Lund, december 2001
- [6] Arriagada J., "On the Analysis and Fault-Diagnosis Tools for Small-Scale Heat and Power Plants", Doktorsavhandling, Lund, december 2003
- [7] Assadi M., "Methods and Tools for Analysis and Optimization of Power Plants", Doktorsavhandling, Lund, 2000
- [8] Olausson P., "Tools for Environmental Design and Operation of Heat and Power Plants", Licentiatavhandling, Lund, december 2001
- [9] Olausson P., "On the Selection of Methods and Tools for Analysis of Heat and Power Plants", Doktorsavhandling, Lund, december 2003
- [10] Fast M., "Artificial Neural Networks for Gas Turbine Modelling and Sensor Validation", Examensarbete, Lund, december 2005
- [11] Kaiadi M., "Artificial Neural Networks Modelling for Monitoring and Performance Analysis of a Heat and Power Plant", Examensarbete, Lund, januari 2006
- [12] Kröse B., van der Smagt P., "An Introduction to Neural Networks", 1996
- [13] "Energiläget 2004", Energimyndigheten
- [14] Naturvårdsverket, Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se> [30102007]
- [15] Skatteverket, Tillgänglig: <http://www.skatteverket.se/> [27092007]
- [16] Bioenergiportalen, Tillgänglig: <http://www.bioenergiportalen.se/> [27092007]
- [17] Energimyndigheten. Tillgänglig: <http://www.energimyndigheten.se/> [27092007]
- [18] Regeringen. Tillgänglig: <http://www.regeringen.se/>. [27092007]
- [19] "Industrial^{IT} 800xA – System Version 4.1 Configuration", ABB Manual



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