

Yhdyskuntien energiatekniikka kaukolämmön ja kaukojäähdytyksen näkökulmasta

Risto Lahdelma

Yhdyskuntien energiatekniikan professori (alkaen 1.4.2009)

Teknillinen korkeakoulu / Energiatekniikan laitos

Email: risto.lahdelma@hut.fi

Puh: +358 40 503 1030

Sisältö

- Yhdyskuntien energiatekniikan professori
- Opetus
- Tutkimusalan painopisteet
- Työsuunnitelma
- Professuurin työsuunnitelma
- Suunniteltuja tutkimusaiheita
- Case: Trigeneneration modelling and optimization
- Case: CHP expansion planning
- Julkaisuja

Yhdyskuntien energiatekniikan professuuri (Chair of Energy Technology for Communities)

- Perustettu Suomen Kaukolämpö ry:n lahjoituksena TKK:n Insinööritieteiden ja arkkitehturin tiedekuntaan, Energiatenkiikan laitokselle
- Professuurin alaan katsotaan kuuluviksi mm.
 - yhteistuotanto- ja monienergiajärjestelmät, jotka tuottavat tyypillisesti lämpöä ja sähköä, mutta mahdollisesti myös jäähdytystä tai jalostettuja polttoaineita,
 - energiaratkaisujen ja muun yhdyskuntarakenteen kuten rakennuskannan, liikenteen, teollisuuden ja jätehuollon väliset yhteydet ja integrointi,
 - yhdyskuntien energiaratkaisuiden operatiivinen ja strateginen suunnittelu ja optimointi.
- Uuden professuurin toivotaan vahvistavan erityisesti energia-alan jatkokoulutusta ja luovan entistä parempia edellytyksiä tutkimukselle
 - Tohtorikoulutuksen parempi kytkeminen alan teollisuuteen

Yhdyskuntien energiatekniikan ja energiatalouden sivuaine

- Uusi sivuaine, joka koostuu kahdesta 20 op moduulista
 - Tarkoitus että sivuaine soveltuu esitietovaatimusten puolesta myös muille kuin energiatekniikan lukijoille
 - Yhdyskuntien energiatekniikan ja energiatalouden syventävä moduuli
 - Energiamarkkinat 5 op
 - Yhdyskuntien energiajärjestelmät 5 op
 - Energiajärjestelmien mallit ja optimointi 5 op
 - Kaukolämpötekniikka 5 op
 - Yhdyskuntien energiatekniikan erikoismoduuli
 - Harjoitustyöprojekti 10 op
 - Vaihtuvia erikoiskursseja yhteensä 10 op

Tutkimusalan haasteet ja painopisteet

- Luonnonvarojen säästämiseksi ja ilmastonmuutoksen rajoittamiseksi tarvitaan kaikki mahdolliset toimenpiteet:
 - Energian kulutuksen vähentäminen ja energiatehokkuuden parantaminen kaikilla sektoreilla
 - Energian tuotannon tehostaminen entisestään
 - Siirtyminen fossiilisista polttoaineista vähäpäästöisempiin ja CO₂-neutraaleihin energiamuotoihin
- Euroopan komission mukaan yhteistuotanto on lupaavimpia tekniikoita, jolla voidaan lyhyellä aikavälillä saavuttaa merkittäviä parannuksia energiatehokkuuteen

Tutkimusalan haasteet ja painopisteet

- Suomen kylmä ilmasto, energiaintensiivinen teollisuus ja olemattomat fossiilisten energiamuotojen varat ovat vieneet maamme maailman kärkeen energiatehokkuudessa, bioenergian käytössä ja yhteistuotannon hyödyntämisessä
 - Ilmastopolitiikan aiheuttamat lisävaatimukset voivat olla vaikeammin toteutettavissa Suomessa kuin muissa maissa missä tehostamisen varaa on vielä enemmän
 - Toisaalta Suomen asema on teknologian viennin kannalta lupaava
 - Myös tutkimuksessa meillä on hyvät lähtökohdat maailman huipulle

Yhdyskuntien energiatekniikan työsuunnitelma

- Painopisteenä on generisten mallinnus-, optimointi- ja simulointitekniikoiden kehittäminen ja soveltaminen energiantensiivisten arvoketjujen ja yhteiskunnan infrastruktuurin parantamiseksi
 - Tähän sisältyy mm erilaiset yhteistuotantojärjestelmät (sähkö, lämpö, jäähditys jne) ja myös energiavaltainen metsä- ja metalliteollisuus.
 - Energia-intensiivisellä infrastruktuurilla tarkoitetaan mm erilaisia siirtoverkostoja ja kuljetusjärjestelmiä.
- Onnistuneet sovellukset edellyttävät yhteistyötä teollisuuden sekä muiden tiedekunnan oppiaineiden kanssa.
- Ulkoisen rahoituksen jatkuvuus on turvattava T&K-projekteilla.

Yhdyskuntien energiatekniikan työsuunnitelma

- On tärkeää toimia samanaikaisesti eri tasoilla
 - Poliittisella päätöksentekotasolla:
 - Avustetaan päätöksentekijöitä ja viranomaisia asettamaan järkeviä tavoitteita oikean informaation, reaalisten tulevaisuuden skenaarioiden ja rationaalisen päättelyn avulla.
 - Monikriteerisen päätöksenteon menetelmien hyödyntämistä edistetään mm yhteiskuntasuunnittelussa, kaavoituksessa ja vaihtoehtoisten energiamuotojen ja teknologioiden valinnassa.
 - Pitkän aikavälin suunnittelutasolla:
 - Erilaisten investointivaihtoehtojen evaluointi ja vertailu vaihtoehtoisten skenaarioiden valossa.
 - Tällä tasolla voidaan soveltaa monikriteerimenetelmiä yhdistämään kvantitatiivisia ja kvalitatiivisia pitkän aikavälin suunnittelumalleja.
 - Operatiivisella ja ohjaustasolla:
 - Tarvitaan parempia energiainformaatiojärjestelmiä, joiden avulla voidaan ohjata nykyisiä ja tulevia energiajärjestelmiä vastaamaan nopeasti muuttuviin tilanteisiin.
 - Tutkimusalan puitteissa tämä tarkoittaa parempien reaaliaikaisten optimointimallien ja menetelmien kehittämistä ja soveltamista.

Working and development plan

- The chair of Energy Technology of Communities will focus on developing and applying generic modeling, optimization and simulation techniques on energy-intensive value-chains and infrastructure.
 - These include (among others) different kinds of cogeneration systems (CHP, combined heat, power and cooling etc), and also energy-intensive industry (forest and metal industries).
 - Energy-intensive infrastructure includes different transfer and transportation systems (power, heat, traffic).
- Successful applications in different fields requires co-operation both with the industry and other professors of the faculty.
- It is necessary to create and maintain a steady stream of external funding through research projects in these areas.

Working and development plan

- It is important to act simultaneously on different levels.
 - On the policy-level:
 - It is necessary to help decision makers to understand and set the goals properly, based on true information, realistic scenarios for the future, and rational argumentation.
 - Use of multi-criteria decision aiding methods is promoted e.g. in energy-efficient infrastructure planning of communities and when choosing between alternative energy forms and technologies.
 - On the strategic level:
 - It is necessary to evaluate investment options under different alternative future scenarios and compare them in a meaningful way.
 - On this level it is possible to combine quantitative long-term planning models with multi-criteria decision aiding methods.
 - On the operative and control level:
 - It is necessary to develop better energy information systems for existing and future power systems to better respond to changing external factors.
 - Within the chair, this means developing and employing efficient and sophisticated optimization methods to produce results in real-time.

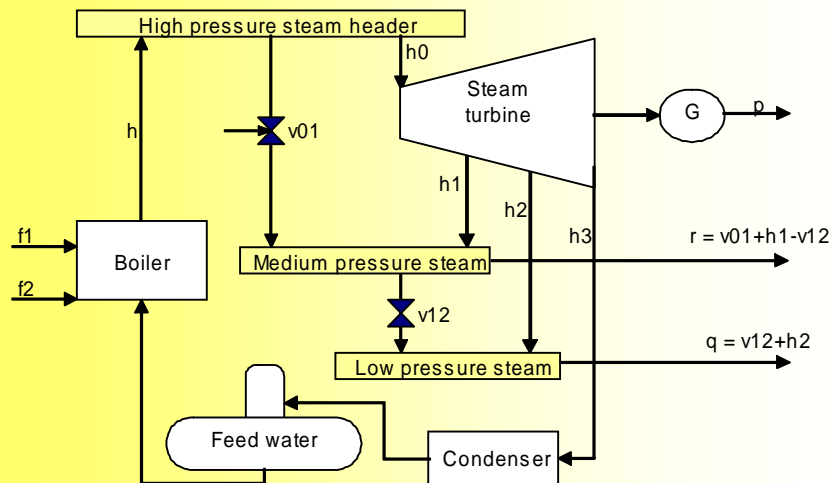
Suunniteltuja tutkimusaiheita

- Yhteiskunnan infrastruktuuriratkaisujen energiatehokkuuden evaluointi ja päätöksenteon tukeminen
- Primäärienergiamuotojen monikriteerinen kustannus-hyötyanalyysi
- Yhteistuotannon/monituotannon mallinnus, simulointi ja optimointi
- Yhteistuotannon skedulointi ja lämpövarastojen optimaalinen hyödyntäminen
- Prosessi-integraation edistäminen teollisuudessa, esim sekundaarilämmön parempi hyödyntäminen
- Energiatietojärjestelmien kehittäminen
- ...

Case: Trigenation modelling and optimization

- Cogeneration means production of two or more energy products together in an integrated process
 - CHP = combined heat and power generation
 - Trigenation:
 - district heating + cooling + power
 - high pressure process heat + low pressure heat + power
 - Technologies: backpressure turbines, combined steam&gas cycles, ...
 - Much more efficient than producing the products separately
 - Energy efficiency increase 40% -> 90%
 - Cost-efficient way to reduce CO₂ emissions
 - Finland is one of the leading countries in cogeneration

Generic backpressure plant for trigeneration



Cogeneration planning

- Objective is to maximize profit subject to production constraints
- Hourly production of the different products must be planned together
 - Production of heat & cooling must meet the demand (natural monopoly)
 - Power production is planned to maximize the profit from sales to the spot market (liberalized power market)
- A long-term model consists of many hourly models in sequence
 - E.g. an annual model consists of 8760 hourly models
 - Hourly forecasts for demand and power price
- Various advanced analyses, e.g. risk analysis require solving many long-term models based on different scenarios
 - Solution must be fast!

Long-term planning model: Trigeneration

subject to

$$\text{Min } \sum_{u \in U} C_u(x_u)$$

$$Hx^t = \begin{bmatrix} P^t \\ Q^t \\ R^t \end{bmatrix} \quad t \in T \text{ (set of hours)}$$

$$x_u \in X_u \quad u \in U \text{ (set of plants)}$$

where

- x is the vector of all decision variables
- x_u is the vector of decision variables for plant u
- x^t is the vector of decision variables for hour t
- $C_u(x_u)$ is the production cost function for plant u
- X_u represent plant-specific constraints
- H is a transmission matrix
- P^t, Q^t, R^t are the hourly demands for the three commodities

Decomposition into hourly models

- The long-term model can be decomposed into hourly models

$$\text{Min } \sum_{u \in U} C_u^t(x_u^t)$$

$$Hx^t = \begin{bmatrix} P^t \\ Q^t \\ R^t \end{bmatrix}$$

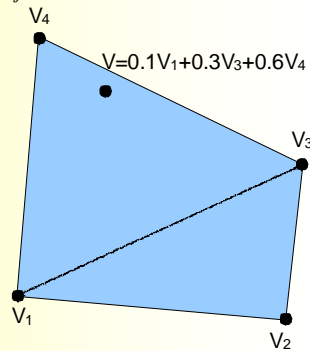
$$x_u^t \in X_u^t \quad u \in U$$

- The necessary decomposition and co-ordination techniques depend on what kind of dynamic constraints are present
 - Without dynamic constraints, decomposition is trivial
- Traditionally, the hourly model is a general LP/MIP model

Efficient model reformulation

- The idea is to encode the operating area of each plant as a convex combination of extreme characteristic points $(c_j^t, p_j^t, q_j^t, r_j^t)$

$$\begin{aligned} \min \quad & C_u^t = \sum_{j \in J_u} c_j^t x_j^t \\ \text{subject to} \quad & P_u^t = \sum_{j \in J_u} p_j^t x_j^t \\ & Q_u^t = \sum_{j \in J_u} q_j^t x_j^t \\ & R_u^t = \sum_{j \in J_u} r_j^t x_j^t \\ & \sum_{j \in J_u} x_j^t = 1 \\ & x_j^t \geq 0 \quad j \in J_u \end{aligned}$$



Solving the reformulated model

- The reformulated model is an LP (linear programming) (or MIP) model with a special structure
 - The special structure allows the model to be solved extremely efficiently using tailored algorithms
 - Power Simplex (PS) for CHP (two-generation) models
 - Three Commodity Simplex (TCS) for trigeneration problems
 - Extended Power Simplex (EPS) for multi-site CHP problems
 - On-line and off-line envelope construction algorithms (ECON, ECOFF) for CHP problems under the liberalized market
 - The specialized algorithms can be about 20-2000 times faster than generic LP algorithms, such as CPLEX
 - Speed is comparable to specialized network algorithms

Speed of different algorithms

- CHP planning against power market
 - Test models (A1-A6)
 - 3 to 8 convex plants
 - Yearly (8760 h) planning models without dynamic constraints
 - Constraints: 43 800 to 87 600, variables: 420 480 to 1 077 480
 - Solution time on a 2.2 GHz Pentium 4 PC

CPU (ms)	From scratch				Reusing previous results			
	Model	CPLEX	PS	ECON	ECOFF	CPLEX	PS	ECON
A1	22548	127	30	13	24136	44	25	10
A2	24638	191	47	21	29937	52	36	10
A3	30373	191	60	27	34967	60	49	16
A4	33410	260	75	37	38090	77	60	20
A5	37134	315	88	40	46619	80	66	21
A6	40933	403	105	50	51797	96	78	24
Average	31506	247	68	31	37591	68	52	17

Speed of different algorithms

- CHP planning against power market
 - Speedup against CPLEX: 400 to 2300 times

Speed ratio against CPLEX				
Model		PS	ECON	ECOFF
A1		514	895	2349
A2		476	688	2369
A3		508	625	1910
A4		433	559	1642
A5		465	561	1760
A6		428	524	1684
Average		471	642	1952

Case: CHP expansion planning

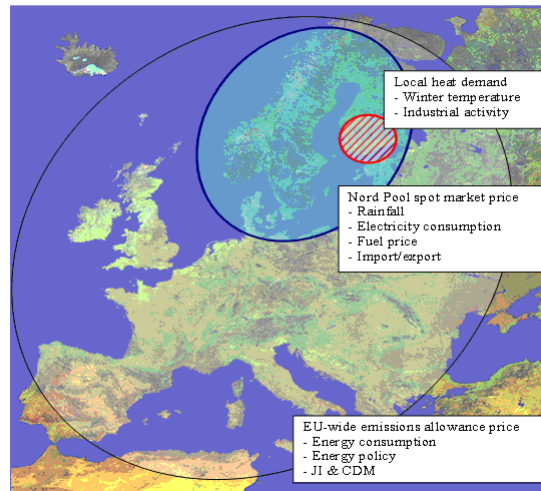
- We wanted to evaluate the benefit of a new plant on the entire CHP system taking into account
 - uncertain heat demand
 - uncertain power price
 - uncertain fuel price
 - uncertain emissions allowance price
 - uncertain initial allocation of allowances
- The life span of a new plant is long, over **20 years**

Expansion planning example

- The existing system consists of two plants with the heat capacity of 100 MW.
 - One is the **coal-fired boiler** and the other is **coal-fired CHP plant**.
 - About **80 MW additional heat capacity is needed** to accommodate the peak heat demand in the winter.
- The following five expansion alternatives are considered:
 - A1** Oil-fired boiler
 - A2** Coal-fired CHP plant with higher efficiency than the current CHP plant in the system
 - A3** Gas-fired CHP plant
 - A4** Gas turbine based CHP plant equipped with gasifier. Half of the fuel can be solved by means of gasifier using biomass residues and the remaining part of fuel is natural gas.
 - A5** Steam turbine based CHP plant equipped with multi-fuel grate boiler with adjustable fuel mixture. About half of the fuel is from biomass residues and the other half is coal.

Uncertainties and their dependencies

- Demand for heat (and cooling) is determined locally
- Market price for power is determined in Scandinavia
- Emission allowance price is determined EU-wide
- Initial allocation of allowances was highly uncertain



Forming scenarios

- We form a large number of **stochastic scenarios** for the uncertainties
 - Scenarios are based on time series analysis of history data for heat demand and power price (NordPool)
 - Heat and coal price are expected to rise about 5% every five years
 - Allowance price is modelled as brownian motion varying from 5 to 20 €/ton CO₂
- For initial emission allowance allocation we considered three **possible scenarios** (no probabilities could be assigned)
 - F = allowances for emissions of 6000 h operation are allocated for first 3 years, 5000 h for following 5 years, and 4000 h for remaining 12 years
 - S = 6000 h for 3 years, 4000 for 17 years
 - E = no initial allowance allocation

Scenario planning

- We solve the alternative CHP system models in each scenario
 - Statistics about the operating costs and revenues of each alternative in each scenario is collected
- We compare the alternatives in terms of net profit:
 - Combined revenues during operation, investment costs, maintenance costs and operating costs

Investment and cost and operating costs of different alternatives

	A1	A2	A3	A4	A5
MC	VL	L	H	VH	M
FC	VH	L	H	M	VL
EL	M	VH	L	VL	VL
IC	VL	H	L	VH	VH

MC = maintenance cost

FC = fuel cost

EL = emission level

IC = Investment cost

VL = very low, L = low, M = moderate, H = high, VH = very high.

Expected profit and 'worst-case profit' of against different allowance allocation methods

	Expected profit			Worst-case profit		
	F	S	E	F	S	E
A1	98.5	54.0	7.4	42.6	23.0	2.3
A2	1115	875	625	474	372	264
A3	909	737	587	388	314	250
A4	980	900	832	419	384	355
A5	1198	1083	962	510	461	409

- Worst case profit = expected profit - 1 standard deviation
 - Worst case profit is about 40% of expected profit. The outcome is very uncertain!

Expected profit and 'worst-case profit' of against different allowance allocation methods

	Expected profit			Worst-case profit		
	F	S	E	F	S	E
A1	98.5	54.0	7.4	42.6	23.0	2.3
A2	1115	875	625	474	372	264
A3	909	737	587	388	314	250
A4	980	900	832	419	384	355
A5	1198	1083	962	510	461	409

- A1 (Oil boiler) with low investment costs has much smaller profit than the other alternatives. Its high fuel costs make it operate only at peak hours.

Expected profit and 'worst-case profit' of against different allowance allocation methods

	Expected profit			Worst-case profit		
	F	S	E	F	S	E
A1	98.5	54.0	7.4	42.6	23.0	2.3
A2	1115	875	625	474	372	264
A3	909	737	587	388	314	250
A4	980	900	832	419	384	355
A5	1198	1083	962	510	461	409

- The most liberal initial allowance allocation favors a coal-fired plant (A2), while more strict allocations promote cleaner technologies (A3, A4, A5)

Expected profit and 'worst-case profit' of against different allowance allocation methods

	Expected profit			Worst-case profit		
	F	S	E	F	S	E
A1	98.5	54.0	7.4	42.6	23.0	2.3
A2	1115	875	625	474	372	264
A3	909	737	587	388	314	250
A4	980	900	832	419	384	355
A5	1198	1083	962	510	461	409

- The advanced technologies (A4, A5) are competitive under strict allowance allocation
- The grate boiler technology with fuel mix (A5) has the best 'worst-case' behaviour.
 - It is able to adapt to variable external factors (fuel and power price, heat demand, etc)

Conclusions

- Due to its high energy efficiency, CHP technology is beneficial when mitigating CO₂ emissions
- The interdependence between heat and power production makes CHP planning difficult
- We compared different technologies for expanding a CHP system using
 - a long-term optimization model and
 - stochastic scenarios to represent the future uncertainties
- In this case, the multi-fuel grate boiler technology could best adapt to the different uncertainties

Julkaisuja

- Lahdelma R., Hakonen H.: An efficient linear programming algorithm for combined heat and power production. *European Journal of Operational Research* 148(1), 2003, 141-151.
- Lahdelma R., Makkonen S., Salminen P.: Multivariate Gaussian criteria in SMAA. *European Journal of Operational Research* 170(3), 2006, 957-970.
- Lahdelma R., Makkonen S., Salminen P.: Two ways to handle dependent uncertainties in multi-criteria decision problems. *Omega* 37(1), 2009, 79-92.
- Lahdelma R., Salminen P.: SMAA-2: Stochastic Multicriteria Acceptability Analysis for Group Decision Making. *Operations Research* 49(3), 2001, 444-454.
- Makkonen S., Lahdelma R.: Analysis of power pools in the deregulated energy market through simulation. *Decision Support Systems* 30(3), 2001, 289-301.
- Makkonen S., Lahdelma R.: Non-convex power plant modelling in energy optimization. *European Journal of Operational Research* 171(3), 2006, 1113-1126.
- Makkonen S., Lahdelma R., Asell A.-M., Jokinen A.: Multi-criteria decision support in the liberated energy market. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 12(1), 2003, 27-42.
- Rong A., Hakonen H., Lahdelma R.: An efficient linear model and optimization algorithm for multi-site combined heat and power production. *European Journal of Operational Research* 168(2), 2006, 612-632.
- Rong A., Hakonen H., Lahdelma R.: A variant of the dynamic programming algorithm for unit commitment of combined heat and power systems. *European Journal of Operational Research* 168(2), 2006, 612-632.
- Rong A., Hakonen H., Lahdelma R.: A variant of the dynamic programming algorithm for unit commitment of combined heat and power systems. *European Journal of Operational Research* 190(3), 2008, 741-755.

Julkaisuja

- Rong A., Hakonen H., Lahdelma R.: A dynamic regrouping based sequential dynamic programming algorithm for unit commitment of combined heat and power systems. *Energy Conversion and Management* 50(4), 2009, 1108-1115.
- Rong A., Lahdelma R.: An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration. *Applied Energy* 82(1), 2005, 40-63.
- Rong A., Lahdelma R.: An effective heuristic for combined heat and power production planning with power ramp constraints. *Applied Energy* 84(3), 2007, 307-325.
- Rong A., Lahdelma R.: CO2 emissions trading planning in combined heat and power production via multi-period stochastic optimization. *European Journal of Operational Research* 176(3), 2007, 1874-1895.
- Rong A., Lahdelma R.: Efficient algorithms for combined heat and power production planning under the deregulated electricity market. *European Journal of Operational Research* 176(2), 2007, 1219-1245.
- Rong A., Lahdelma R.: An effective heuristic for combined heat and power production planning with power ramp constraints. *Applied Energy* 84(3), 2007, 307-325.
- Rong A., Lahdelma R.: An efficient envelope-based Branch and Bound algorithm for non-convex combined heat and power production planning. *European Journal of Operational Research* 183(1), 2007, 412-431.
- Rong A., Lahdelma R., Grunow M.: An improved unit decommitment algorithm for combined heat and power systems. *European Journal of Operational Research* 195(2), 2009, 552-562.
- Rong A., Lahdelma R., Luh P.: Lagrangian relaxation based algorithm for trigeneration planning with storages. *European Journal of Operational Research* 188(1), 2008, 240-257.