

Aggregoitu lämminvesivaraajien optimointi ja vaikutus pörssihintaan

Hannu Huuki, Santtu Karhinen

Suomen ympäristökeskus & OBS, taloustieteen yksikkö

9.10.2017

Tutkimuksen taustaa

- ▶ Kysyntäjouston rooli korostuu
 - ▶ Vaihtelevan tuotannon lisääntyminen
 - ▶ Sähkön varastoinnin kustannus
- ▶ Lämminvesivaraajan käyttö energiavarastona
 - ▶ Optimoinnin säästöpotentiaali eri tuuliskenaarioilla
 - ▶ Vertailu kiinteä hinta (Flat-rate) ja yösäkölämmittäjä (Time-of-Use)
 - ▶ Aggregoidaan useamman kotitalouden lämminvesivaraajien ohjaus
 - ▶ Säästöpotentiaali eri osallistumisasteilla
 - ▶ Systemivaikutus

Lämminvesivaraaja

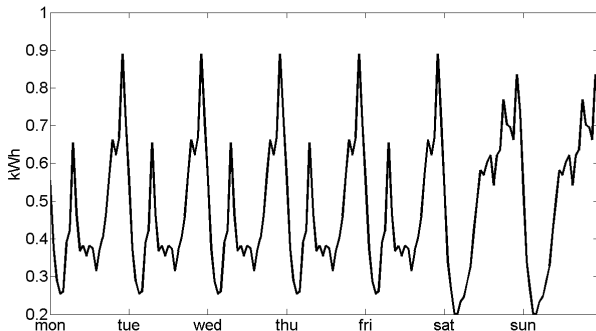
- ▶ Tilavuus 290L
- ▶ Teho $\bar{x} = 3\text{kW}$
- ▶ Energiavarastokapasiteetti

$$\bar{S} = (c_p * m * dT) * (1/3600) = 16.917 \text{ kWh} \quad (1)$$

- ▶ $c_p = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg}^\circ\text{C})$, $m = 290 \text{ kg}$, ja $dT = 50^\circ\text{C}$
- ▶ $\bar{S}/\bar{x} = 5.5\text{h}$

Edustava kotitalous

- ▶ 4 henkilöä, jokainen kuluttaa 50L lämmintä vettä päivässä
- ▶ $C^{daily} = 11.667kWh$
- ▶ Edustava kulutusprofiili (Zimmermann, 2009):



Kustannus

- ▶ $p_t = (1 + t^{VAT})p_t^{DA-RTP} + t^E + p^{T\&D}$
 - ▶ $t^{VAT} = 24\%$
 - ▶ $t^E = 27.9372 \text{ €/MWh}$
 - ▶ $p^{T\&D} = 36.45 \text{ €/MWh}$
- ▶ Kiinteä: $p_t^F = \text{mean}(p_t^{DA-RTP})$
- ▶ Yösähkö: $p_t^{ToU} = \text{mean}(p_t^{DA-RTP}) \forall t \in [10\text{pm} \text{ } 7\text{am}]$
- ▶ Optimointi: p_t^{DA-RTP} ja "äylämmminvesivaraaja"
 - ▶ $N = [1 \ 25000 \ 50000 \ 75000 \ 100000 \ 491133]$

Hintojen estimointi

	$\log(P_t^{DAM})$
Constant	1.021659*** (0.246257)
Load _t	0.000189*** (3.25E-05)
Wind _t	-0.000270*** (6.24E-05)
Nuclear _t	-0.000138** (6.13E-05)
CHP _t	6.53E-05 (4.70E-05)
Other _t	0.000148*** (3.45E-05)
Interconnector EST _t	-0.000407*** (5.26E-05)
Interconnector SE1 _t	9.89E-06 (3.83E-05)
Interconnector SE3 _t	-0.000126*** (3.68E-05)
Interconnector RUS _t	-0.000243*** (4.18E-05)
Month indicators	Yes
Day-of-week indicators	Yes
Hour-of-day indicators	Yes
Observations	8,760
R ²	0.658907

Hintojen estimointi

Wind share of load	Min	Max	Mean	SD
Sample	0.32	150.06	29.66	14.46
2.5%	6.81	105.27	28.76	12.92
5%	5.66	102.26	27.20	12.53
10%	3.85	97.61	24.36	12.01
15%	2.59	94.22	21.96	11.69
20%	1.77	90.96	19.92	11.47

Kustannusten minimointi: Yksittäinen lämminvesivaraaja

- ▶ Minimoi lämmityskustannukset yli vuoden ($T = 8736$)

$$\min_{0 \leq x_t \leq \bar{x}} \sum_{t=1}^T \beta^{t-1} p_t x_t, \quad (2)$$

s.t.

$$0 \leq S_{t+1} = S_t - c_t + x_t \leq \bar{S}. \quad (3)$$

Kustannusten minimointi: Aggregaattori

- ▶ Vesivaraajien lämmitysprofili vaikuttaa tuntihintaan:

$$p_t^{DA-RTP}(x_t|N) = (1 + \alpha_1(x_t - \hat{x}_t)N)\bar{p}_t^{DA-RTP} \quad (4)$$

- ▶ Vaikutus voimakkaampi mitä suurempi verkostokoko N tai kysynnän hintavaikutuksen kerroin α_1

$$\frac{dp_t^{DA-RTP}(x_t|N)}{dx_t} = \bar{p}_t^{DA-RTP} \alpha_1 N, \quad (5)$$

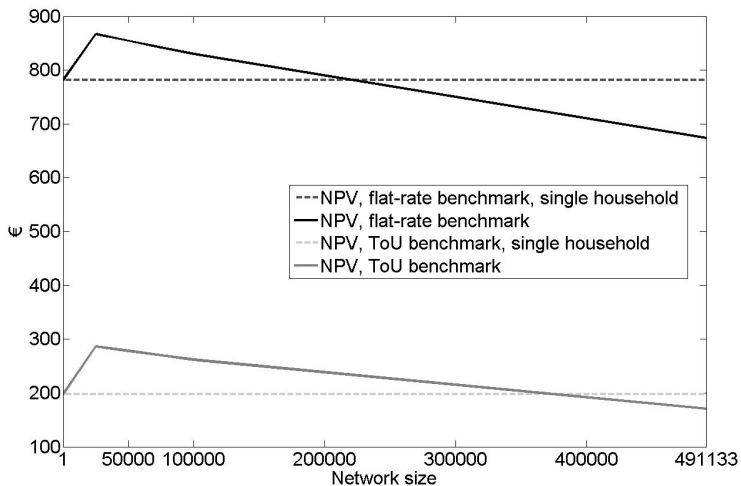
- ▶ Aggregaattori minimoi kokonaiskustannukset huomioiden hintavaikutuksen

$$\min_{0 \leq x_t N \leq \bar{x} N} \sum_{t=1}^T \beta^{t-1} p_t(x_t|N) x_t N, \quad (6)$$

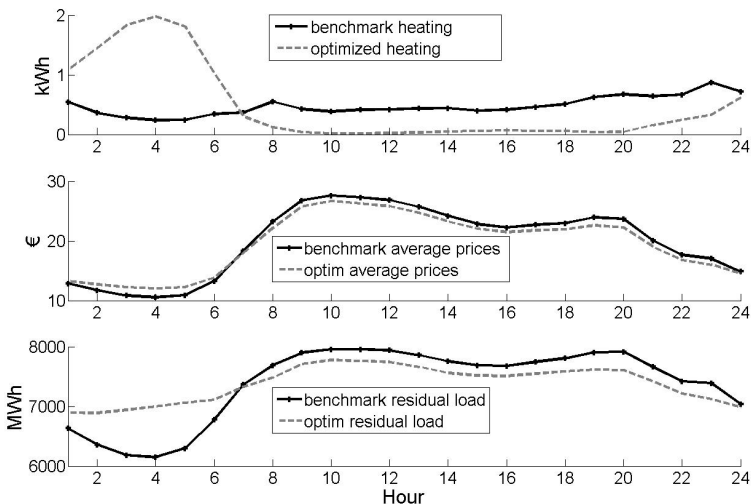
Tulokset: Säästöt kotitaloutta kohden € (% vertailuskenaariosta)

	Flat				
	Wind 2.5%	Wind 5%	Wind 10%	Wind 15%	Wind 20%
N = 1	60.01 (14.37)	57.47 (14.04)	53.21 (13.48)	49.84 (13.04)	47.00 (12.64)
N = 25 000	66.67 (16.00)	63.94 (15.62)	59.09 (14.97)	55.21 (14.44)	51.98 (13.98)
N = 50 000	65.67 (15.74)	62.92 (15.38)	58.20 (14.75)	54.44 (14.25)	51.30 (13.81)
N = 75 000	64.60 (15.49)	61.91 (15.14)	57.33 (14.54)	53.69 (14.06)	50.65 (13.64)
N = 100 000	63.55 (15.25)	60.94 (14.90)	56.49 (14.33)	52.96 (13.87)	50.01 (13.47)
N = 491 133	50.35 (12.15)	48.56 (11.94)	45.69 (11.65)	43.55 (11.46)	41.79 (11.31)
	ToU				
	Wind 2.5%	Wind 5%	Wind 10%	Wind 15%	Wind 20%
N = 1	13.79 (3.71)	13.43 (3.67)	13.13 (3.70)	13.18 (3.81)	13.28 (3.93)
N = 25 000	20.90 (5.63)	20.20 (5.53)	19.26 (5.43)	18.74 (5.42)	18.41 (5.45)
N = 50 000	20.19 (5.44)	19.54 (5.35)	18.67 (5.27)	18.22 (5.28)	17.94 (5.31)
N = 75 000	19.50 (5.26)	18.90 (5.18)	18.11 (5.11)	17.72 (5.13)	17.49 (5.18)
N = 100 000	18.84 (5.08)	18.28 (5.01)	17.56 (4.96)	17.24 (4.99)	17.06 (5.05)
N = 491 133	11.46 (3.11)	11.29 (3.11)	11.30 (3.21)	11.56 (3.37)	11.87 (3.54)

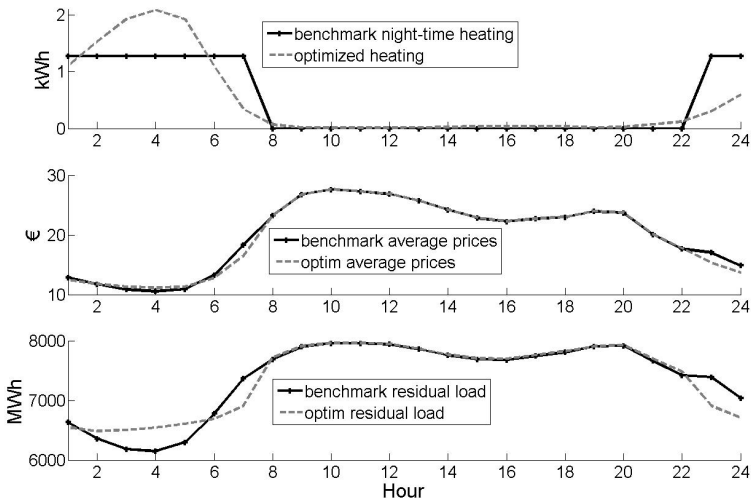
Tulokset: nettonykyarvo (pitoaika 20 vuotta)



Tulokset: optimointi vs. kiinteä hinta



Tulokset: optimointi vs. yösähkö



Tulokset: korrelaatiot

	Flat				
	Wind 2.5%	Wind 5%	Wind 10%	Wind 15%	Wind 20%
N = 1	-0.45	-0.44	-0.41	-0.38	-0.35
N = 25 000	-0.47	-0.46	-0.43	-0.40	-0.37
N = 50 000	-0.47	-0.46	-0.43	-0.40	-0.37
N = 75 000	-0.47	-0.46	-0.43	-0.40	-0.37
N = 100 000	-0.47	-0.46	-0.43	-0.40	-0.37
N = 491 113	-0.41	-0.40	-0.38	-0.36	-0.33

	ToU				
	Wind 2.5%	Wind 5%	Wind 10%	Wind 15%	Wind 20%
N = 1	0.54	0.54	0.53	0.53	0.52
N = 25 000	0.57	0.57	0.57	0.56	0.55
N = 50 000	0.58	0.58	0.57	0.57	0.56
N = 75 000	0.58	0.58	0.58	0.58	0.56
N = 100 000	0.59	0.59	0.59	0.58	0.57
N = 491 133	0.71	0.71	0.69	0.68	0.67

Tulokset: hintavaihtelu [€/MWh] (päivän max. ja min. hintojen erotuksen keskiarvo/hintojen keskihajonta)

	Flat				
	Wind 2.5%	Wind 5%	Wind 10%	Wind 15%	Wind 20%
N = 1	25.34/12.92	24.36/12.53	22.68/12.01	21.42/11.69	20.37/11.47
N = 25 000	25.05/12.85	24.09/12.47	22.45/11.60	21.22/11.65	20.20/11.43
N = 50 000	24.77/12.79	23.82/12.41	22.23/11.90	21.02/11.60	20.03/11.39
N = 75 000	24.49/12.73	23.56/12.35	22.01/11.85	20.83/11.55	18.86/11.34
N = 100 000	24.22/12.66	23.31/12.30	21.79/11.80	20.64/11.51	19.70/11.30
N = 491 133	20.84/11.75	20.14/11.43	19.04/11.03	18.23/10.81	17.56/10.67
	ToU				
	Wind 2.5%	Wind 5%	Wind 10%	Wind 15%	Wind 20%
N = 1	25.34/12.92	24.36/12.53	22.68/12.01	21.42/11.69	20.37/11.47
N = 25 000	25.22/12.91	24.25/12.52	22.59/12.00	21.34/11.68	20.30/11.46
N = 50 000	25.10/12.89	24.14/12.51	22.50/11.99	21.26/11.68	20.24/11.46
N = 75 000	24.99/12.88	24.03/12.50	22.41/11.98	21.19/11.67	20.18/11.45
N = 100 000	24.88/12.87	23.93/12.49	22.33/11.97	21.13/11.66	20.13/11.44
N = 491 133	23.93/12.77	23.06/12.39	21.61/11.88	20.53/11.57	19.62/11.36

Johtopäätökset

- ▶ Säästö 13.5€ - 20€ vuodessa lämminvesivaraajan tuntihintaoptimoinnilla
- ▶ Aggregointi kasvattaa kotitalouden säästöjä aluksi, mutta hyöty lisäjäsenistä laskeva
- ▶ Positiivinen systeemivaikutus
- ▶ Rajoitukset / jatkotutkimus
 - ▶ Yksinkertaistettu hintamallinnus vs. kysyntä/tarjonta kehikko
 - ▶ Homogeeniset, deterministiset kotitaloudet vs. heterogenisuus ja stokastiikka
 - ▶ Tuntihintaoptimointi vs. säätösähkömarkkina
 - ▶ Kotitalouden aurinkopaneelit