



Aalto-yliopisto
Perustieteiden
korkeakoulu

Tuulivoima-akkuportfolion mitoituksen optimointi spot- ja tasesähkötmarkkinoilla (valmiin työn esittely)

Milla Linnervuo

15.6.2026

Ohjaaja: DI Elias Keski-Nisula

Valvoja: Prof. Ahti Salo

Työn saa tallentaa ja julkistaa Aalto-yliopiston avoimilla verkkosivuilla. Muilta osin kaikki oikeudet pidätetään.

Taustaa (1/3)

- Sähkötarkkinoilla tuottajat jättävät spot-tarjoukset päivää etukäteen huutokauppahinnalla luvaten tuottaa tietty määrä sähköä
- Taseselvittäminen: tasesakkoja tai -tuloja
- Suomen sähkömarkkinat ovat muuttuneet viime vuosina:

1h → 15 min tasejakso 2023
1h → 15 min tasehinnoittelu 03/2025
1h → 15 min spot-hinnoittelu 10/2025

Taustaa (2/3)

- Kestävän kehityksen tavoittelu on lisännyt investointeja uusiutuvaan energiaan
- Tuulivoimapuistoja on rakennettu runsaasti
- Tuulivoimapuistoilla on sähkömarkkinoilla erityispiirteitä: sääriippuvuus, kannibalisaatioefekti
- Tuulivoimatuotannon heikko ennustettavuus → suuria riskejä
- Markkinamuutosten myötä sähkömarkkinoiden volatilitteetti on kasvanut

Taustaa (3/3)

- Akut (BESS, Battery Energy Storage Systems) on nähty yhtenä riskien hallinnan ja tuottojen turvaamisen ratkaisuna
- Aiemmassa tutkimuksessa on arvioitu akun kykyä nostaa tuulivoimalaitoksen tuottoja, joskin riskinhallintanäkökulmasta tutkimusta on vähän; on myös maa- ja markkinakohtaista
- BESS on ajankohtainen, kallis investointi

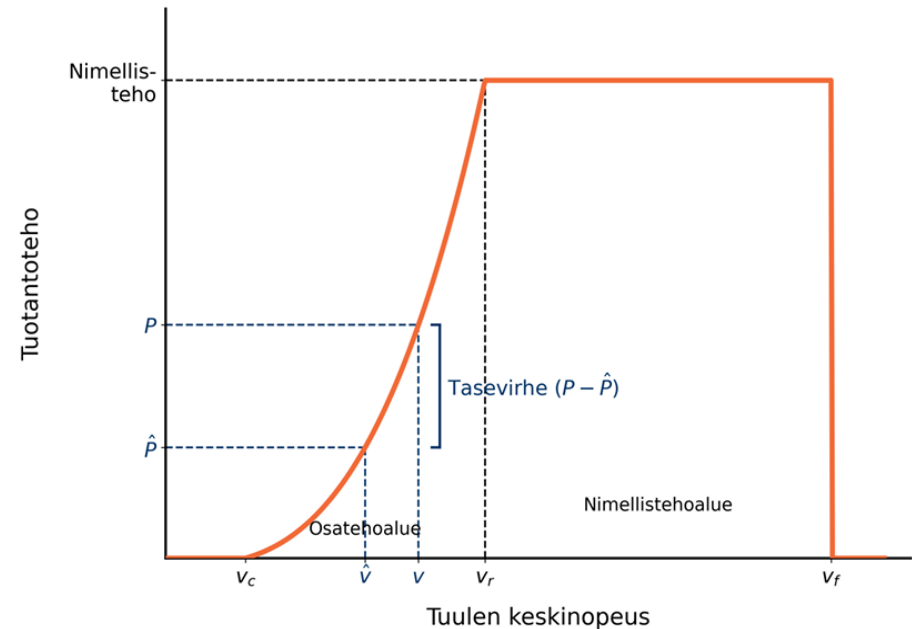
Työn sisältö

- Akun optimaalisten mitoitusten (kapasiteetti, teho) löytäminen 100MW tuulivoimapuiston tasevirheiden tasaamiseksi Suomen markkinakontekstissa spot- ja tasesähkömarkkinoilla
- Akun mallintaminen ja järjestelmän simuloiminen vuoden ajan eri akkukoilla
- Akkuinvestoinnin kannattavuuden tutkiminen Markowitzin tehokkaan rintaman (CVaR vs. odotettu tuotto) avulla
- Perustapaus Tahkoluoto, herkkyysanalyysi tuulipuiston sijainnin suhteen

Tehokäyrä

- Tuuliennusteet Herbiekirjastosta (Global Forecasting system)
- Ilmatieteen laitos FMI tuuliennusteisiin
- Hintadata Nord Poolista (spot-hinnat) ja Fingridiltä (tasesähkö)

$$P(v) = P_{wf} f(v)$$



$$f(v) = \begin{cases} 0, & v \leq v_c, \\ \frac{v^3 - v_c^3}{v_r^3 - v_c^3}, & v_c \leq v \leq v_r, \\ 1, & v_r \leq v \leq v_f, \\ 0, & v \geq v_f, \end{cases}$$

Akun mallinnus ja ajostrategiat

- Akun diskreetti tilayhtälö
$$E_{t+1} = E_t + P_t^c \eta \Delta t - \frac{P_t^d}{\eta} \Delta t.$$
- Kapasiteetti- ja tehorajoitteet
- Perusajostrategia (hintasokea): absoluuttisen tasevirheen minimoiminen puhtaasti fyysisenä suurena. Ylituotannossa ladataan, alituotannossa puretaan
- Spot-tietoinen strategia: Hyödynnetään hinta-arbitraasia niin, että akun kapasiteettia priorisoidaan sitovaan spot-kauppaan hinnan kynnyсарvojen avulla. Kynnyсарvot viikon liukuvasta keskiarvosta ja syklikustannuksesta

Taloudellinen mallinnus ja tulonmuodostus

- Vuoden operatiivinen tuotto perusstrategialla huutokauppa- ja tasesähkömaksuista:

$$R_m(P_b, E_b) = \sum_{i=1}^N \left(\hat{P}_i \pi_i^{spot} + \Delta P_i^{res}(P_b, E_b) \pi_i^{imb} \right) \Delta t$$

- Operatiivinen tuotto spot-tietoisella strategialla:

$$R_{m,spot}(P_b, E_b) = \sum_{i=1}^N \left(\left(\hat{P}_i + P_i^{b,spot} \right) \pi_i^{spot} + \Delta P_i^{res}(P_b, E_b) \pi_i^{imb} \right) \Delta t$$

- Investointikustannus (E, P) lineaarisesti ja annuiteettimenetelmää käyttäen
- Huoltokustannukset purkuenergiasta ja -kustannuksesta

Tehokas rintama

- Odotettu vuositulo oper. tuotosta ja kustannuksista:

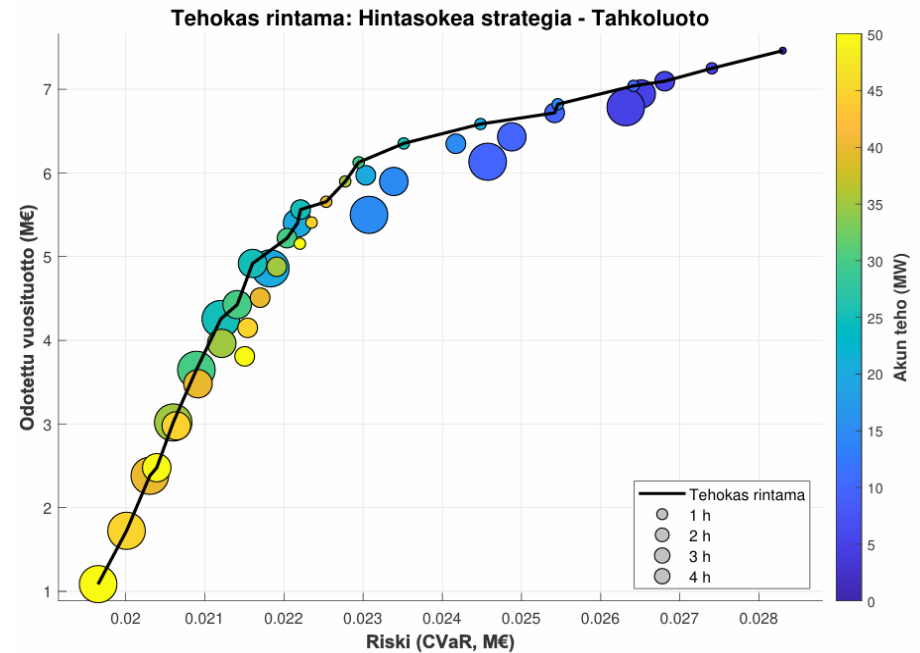
$$\Pi(P_b, E_b) = R_m(P_b, E_b) - C_{CAPEX}(P_b, E_b) - C_{OPEX}(P_b, E_b)$$

- Ehdollinen arvo riskille (CVaR): 5% tappiollimpien päivien keskimääräinen nettotulos
- Hilahalla parametriavaruudesta ei-dominoidut (Pareto-optimaaliset) pisteet:

$$\mathbb{E}[\Pi](P'_b, E'_b) \geq \mathbb{E}[\Pi](P_b, E_b) \quad \text{ja} \quad \text{CVaR}_\alpha(P'_b, E'_b) \leq \text{CVaR}_\alpha(P_b, E_b)$$

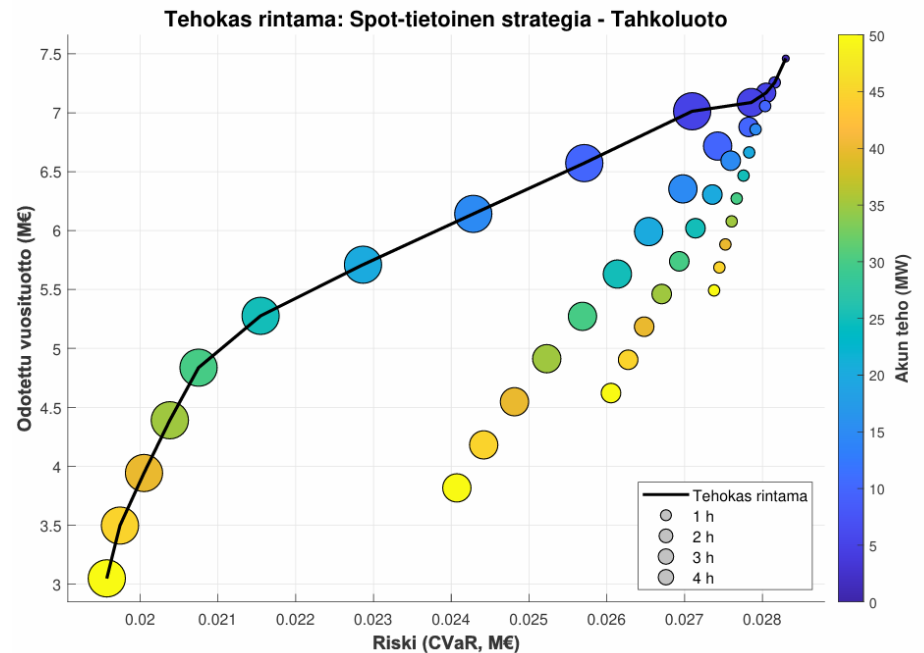
Tulokset: Perusstrategia

- Tasevirheen korjaamisessa akku ei ole tuottosampo, vaan vakuutusinstrumentti
- Yli 25 MW / 50 MWh akuilla tuoton ja riskin suhde huononee jyrkästi



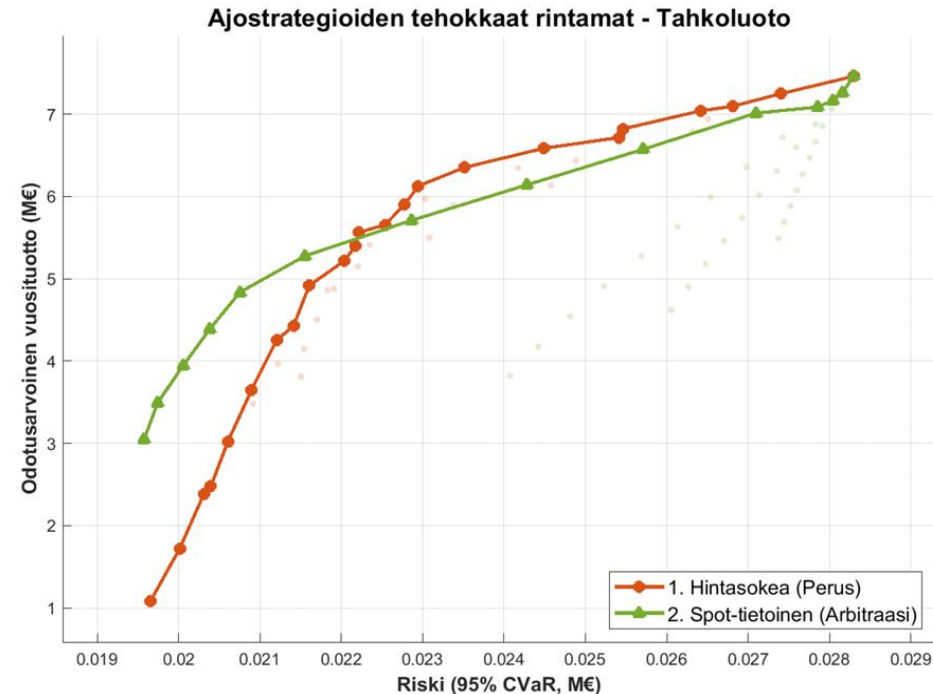
Tulokset: Spot-tietoinen strategia

- 1-3h akut eivät kuulu tehokkaaseen rintamaan: kapasiteetin vaikutus
- Riskin pienentämisen rajahyöty laskee 25 MW jälkeen



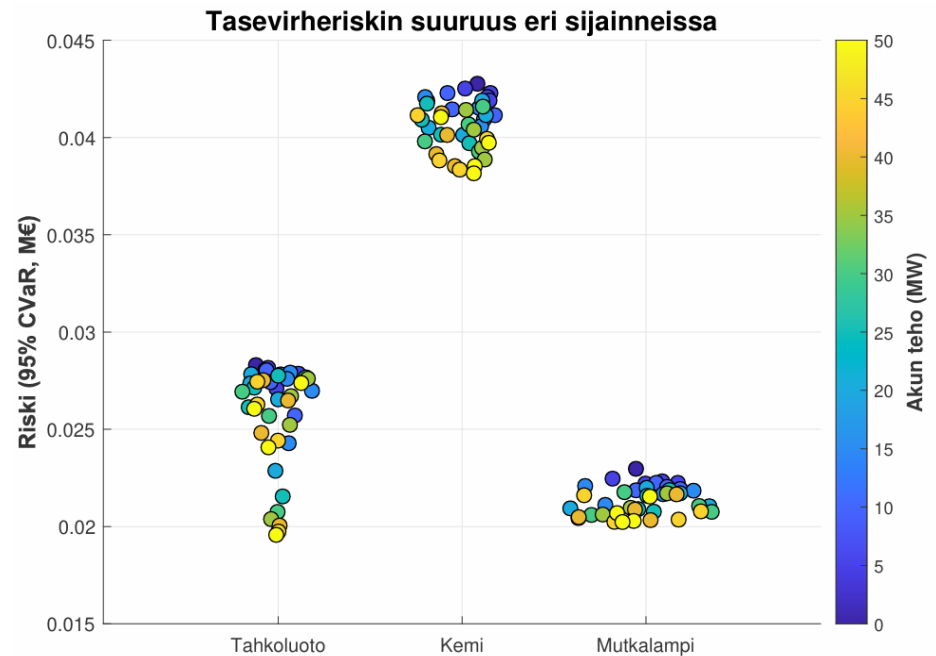
Strategiavertailu

- Strategiavertailu: Suurilla akuilla tasehallinta jättää kapasiteettia arbitraasille, mahdollisuus lisätuloille
- Akku on kallis investointi, lisätuotto ei vielä 2025-hinnoilla kata kuluja ajostrategioilla



Herkkyysanalyysi: sijainnin vaikutus

- Riskiprofiilit erittäin sijaintikohtaisia, otettava huomioon investoinnissa
- Tasevirheriskin lisäksi optimaalisessa strategiassa eroja: Kemissä ja Mutkalammella spot-strategia kannattava pienemmillä akuilla, perusstrategia suuremmilla



Yhteenveto ja johtopäätökset

- **Akku toimii vakuutusinstrumenttina:** Akku leikkaa päivittäistä tasevirheriskiä, mutta ei yksinomaan spot- ja tasesähkömarkkinoilla kasvata portfolion odotettua vuosituottoa.
- **Optimaalinen mitoitus alle 25% tuulipuiston tehosta:** Suurempien akkujen kohdalla investointikustannukset kasvavat nopeammin kuin saavutettu riskin pienentymisen rajahyöty.
- **Sijainti ja strategia ovat ratkaisevia:** Alueelliset erot vaikuttavat merkittävästi tuloksiin, jotka riippuvat myös valitusta ajostrategiasta.
- **Tulevaisuuden näkymät:** Akkuinvestointien todellinen kannattavuus edellyttää todennäköisesti pääsyä myös reservimarkkinoille (esim. FCR/FRR) sekä akkukustannusten laskemista. Muutos on nopeaa.

Tietolähteet

- Lion Hirth. The market value of variable renewables. The effect of solar wind power variability on their relative price. *Energy Economics*, 38:218–236, 2013. ISSN 01409883. doi: 10.1016/j.eneco.2013.02.004.
- Gianluca Mancini, Stefanos Delikaroglou, Eleni Stai, Ognjen Stanojev, ja Gabriela Hug. Wind-Battery Pool Optimal Bidding in German Energy and Secondary Control Reserve Markets. Teoksessa *International Conference on the European Energy Market, EEM*. IEEE Computer Society, 2024. ISBN 9798350381740. doi: 10.1109/EEM60825.2024.10608835
- Iman Naziri Moghaddam, Badrul Chowdhury, ja Milad Doostan. Optimal sizing and operation of battery energy storage systems connected to wind farms participating in electricity markets. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10(3):1184–1193, 2019. ISSN 19493037. doi: 10.1109/TSTE.2018.2863272.
- Brian Blaylock. Herbie: Retrieve Numerical Weather Prediction Model Data (2026.1.1). Zenodo. 2026. doi: 10.5281/zenodo.18471944