



Aalto-yliopisto
Perustieteiden
korkeakoulu

Tuulivoima-akkuportfolion mitoituksen optimointi spot- ja tasesähkömarkkinoilla (aihe-esittely)

Milla Linnervuo

06.03.2026

Ohjaaja: *DI Elias Keski-Nisula*

Valvoja: *Prof. Ahti Salo*

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

Taustaa (1/4)

- Sähkömarkkinoilla 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 (2/4)

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

Taustaa (3/4)

- Markkinamuutosten myötä sähkömarkkinoiden volatiliteetti on kasvanut
- Akut (BESS, Battery Energy Storage Systems) on nähty yhtenä riskien hallinnan ja tuottojen turvaamisen ratkaisuna
- Akku latautuu, kun sähköä tuotetaan yli tuotantoennusteen ja purkaa latausta, kun tuotetaan ali ennusteen

Taustaa (4/4)

- Aiemmassa tutkimuksessa on arvioitu akun kykyä nostaa tuulivoimalaitoksen tuottoja, joskin riskinhallintanäkökulmasta tutkimusta on vähän; on myös maa- ja markkinakohtaista
- BESS on ajankohtainen, kallis investointi

Tavoitteet

- Löytää akun optimaalinen mitoitus (kapasiteetti, teho) tuulivoimapuiston tasevirheiden tasaamiseksi Suomen markkinakontekstissa
- Tutkia investoinnin koon vaikutusta tuottoihin Markowitzin tehokkaan rintaman (CVaR vs. odotettu tuotto) avulla
- Vertailla akkuinvestointia tuulipuistojen eri sijainneilla
- Tutkia riskin, investoinnin koon, sijainnin ja tuoton välisiä riippuvuuksia

Rajaukset

- Suomen markkinakonteksti
- Fokus spot- ja tasemarkkinoissa (reservi- ja säätösähkömarkkinat, kuten FCR/aFRR, rajattu pois)
- Akun sähkökemiallinen kuluminen otetaan huomioon yksinkertaisena muuttuvana kustannuksena
 - muut operatiiviset kulut rajattu pois
- Heuristinen ajostrategia: Ohjaus reagoi tasevirheeseen reaaliajassa. Tulevaisuutta ennakoiva stokastinen optimointi on rajattu työn ulkopuolelle
- Akun ei oleteta vaikuttavan markkinahintaan
- Ei oleteta olevan siirtokapasiteetin rajoitteita tuulipuiston ja kantaverkon liityntäpisteissä

Aineistot

- Herbie-kirjasto tuuliennusteisiin
- Ilmatieteen laitos FMI tuulitoteumiin
- Hintadata Fingridiltä (tasesähkö) ja Nord Poolista (spot-hinnat)

Tietolähteet

- G. Mancini, S. Delikaroglou, E. Stai, O. Stanojev and G. Hug, "Wind-Battery Pool Optimal Bidding in German Energy and Secondary Control Reserve Markets," 2024 *20th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, Istanbul, Turkiye, 2024, pp. 1-9, <https://doi.org/10.1109/EEM60825.2024.10608835>
- I. N. Moghaddam, B. Chowdhury and M. Doostan, "Optimal Sizing and Operation of Battery Energy Storage Systems Connected to Wind Farms Participating in Electricity Markets," in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 3, pp. 1184-1193, July 2019, <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2863272>

Menetelmät

- Datan käsittely ja mallinnus Pythonilla ja Matlabissa
- Akun operatiivisen toiminnan mallintaminen vuoden aikajänteellä kolmea eri heuristista strategiaa käyttäen: tasevirheiden korjaaminen
- Tehokkaan rintaman muodostaminen monitavoiteoptimoinnilla CVaR-arvoista ja vuosituotoista, siten että eri pisteet vastaavat eri akkukokoja
- Muuttujien välisten riippuvuuksien ja herkkyyksien vertailu hajontakuvioiden avulla

Aikataulu

- Tammikuu: aiheeseen liittyvään kirjallisuuteen perehtyminen
- Helmikuu: datan käsitteleminen, simulointien tekeminen
- 6.3. aihe-esittely
- Maaliskuu: optimointi, analyysi
- 30.4. valmiin työn esittely