

Kulutusjouston identifiointi energiaintensiivisissä teollisuusprosesseissa

Teijo Juntunen, Tampereen yliopisto

20.3.2026

Kuka?

- Teijo Juntunen
- Kajaanista Helsingin ja Espoon kautta Tampereelle siirtynyt väitöskirjatutkija
- Valmistunut automaatiotekniikan DI:ksi 2018
- Siitä lähtien toiminut tutkijana, projektitutkijana ja nyt väitöskirjatutkijana Tampereen yliopistolla Risto Ritalan ja Matti Vilkon tutkimusryhmissä
- Tutkimuskohteita mm:
 - Reittioptimointi
 - Sensor Management
 - Jousto-optimointi
 - Energiasäätelyteollisuuden teollisuusalojen kulutusjoustoprofiilin tunnistaminen
 - Virtuaalivoimalaitoksen prosessioptimointi ja kulutusjoustoprofiilin määrittäminen
- Vapaa-ajallaan nauttii pelaamisesta ja korkealuokkaisesta kulttuurista perheensä (Vaimo, tytär ja kissa) kanssa .



Esityksen sisältö

Kulutusjoustolaskennan motivointi

Kulutusjoustojen identifiointi

- Askel 1: Prosessin joustolähteiden tunnistaminen
- Askel 2: Prosessimalli
- Askel 3: Optimointimalli joustovarojen määrittämiseen
- Askel 4: Joustovarojen validointi ja käyttö

Käytännössä havaitut haasteet joustovarojen hyödyntämiseen

Kulutusjousto- laskennan motivointi

- Kulutusjousto on sähkönkäytön ajallista ja määrällistä muutosta hintojen vaihtelun ohjaamana
- Vihreän siirtymän kasvattama energiantuotannon volatilitteetti on aiheuttanut lisääntyneen tarpeen (ja taloudellisen hyödyn) kulutusjoustojen identifioinnille erityisesti energiantensiivisistä prosesseista
 - Metallinjalostus
 - Jätevedenpuhdistus
 - Keramiikkatehtaat
- Kulutusjouston ekologisuus on välillistä ja mahdollistavaa. Optimointi pyrkii minimoimaan energiakustannuksia.

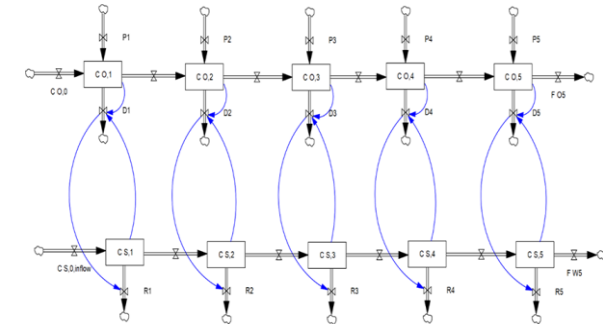


This Photo by Unknown Author is licensed under [CC BY](#)

Kulutusjoustojen identifiointi – Askel 1: Prosessin joustolähteiden tunnistaminen

Etsitään prosessin sisäiset varastot

- Lämpövarastot
- Välivarastot
- Prosessisuureen varastot
 - Happivarasto
 - Jätevarastot



Kuinka tunnistetaan

- Keskustelut tuotantolaitoksen asiantuntijoiden kanssa prosessista
- Prosessin SotA-tutkimus
- Tuotantolaitosvierailut

Kulutusjoustojen identifiointi - Askel 2: Prosessimallin luominen

- Huomioidaan markkinoiden aikaikkunat tarvittavan mallin kompleksisuutta arvioitaessa
 - Nykyisin pienin markkinoiden aikayksikkö (MTU) on 15 min
 - Tarkkuus vs. laskenta-aika
- Yleensä kaksi etenemistapaa
 - Datapohjainen raskas tarkka malli
 - CFD, FEM, FVM...
 - Tämä malli redusoidaan laskennallisesti kevyemmäksi (ROM)
 - Fysiikkapohjainen malli
 - Energia- ja massataseet
 - Approksimaatiot, linearisoinnit mallin keventämiseen

Kulutusjoustojen identifiointi - Askel 3: Optimointimalli joustovarojen määrittämiseen

- Määritetään tavoitefunktio
 - Halutaan määrittää prosessin energiankulutuksen ala- ja ylärajat kullekin optimointihorisontin MTU:lle
 - Tämä on yleensä prosessioptimointiagentin (POA) tehtävä
 - EMS käyttää näitä varoja ratkaistessaan ED-ongelmaa, eli taloudellisinta tapaa käyttää kaikkia joustoressurssejaan
 - Esimerkkিতavoite: mikä on pienin ja suurin ilmastusteho tietyllä aika-askeleella, jolla pysytään yhä jäteveden päästörajoissa (ja muissa rajoitteissa)
 - Voidaan myös laskea tuotannon energiankulutuksen minimoiva ratkaisu lähtöpositioksi energiamarkkinoille, jota lähdetään iteratiivisesti muokkaamaan energianhallintajärjestelmän käskyjen mukaisesti.

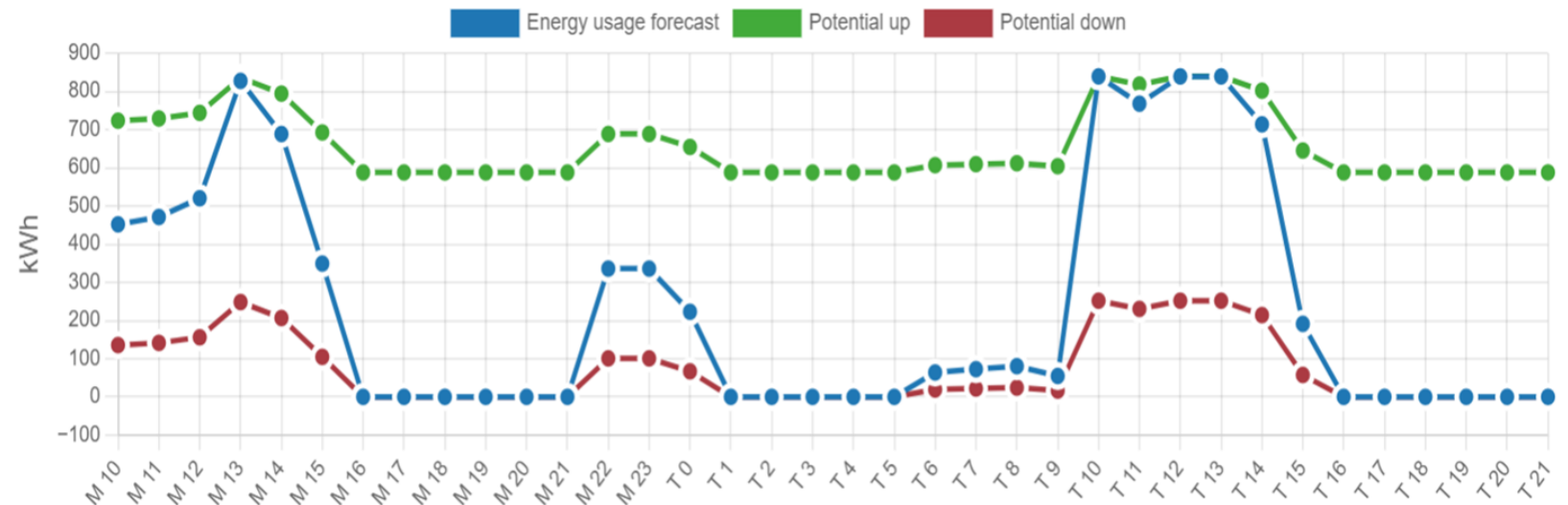
Kulutusjoustojen identifiointi - Askel 3: Optimointimalli joustovarojen määrittämiseen

Määritetään rajoiteyhtälöt

- Fysiikkapohjaisen mallin yhtälöt
- Suureiden ja niiden muuttumisnopeuden ylä- ja alarajat
- Vaaditut herätteet
 - Tuotantoennuste optimointihorisontin ajaksi (esim. 36 h)
 - Prosessimittaukset viestiväylältä ja/tai tilaestimaatit prosessin digitaaliselta kaksoselta
 - Muut inputit päätöksentekijärjestelmältä (DSS)
 - Energianhallintajärjestelmän (EMS) markkinoille tarjoamien joustokauppojen tuottamat lisärajoitteet

Kulutusjoustojen identifiointi - Askel 4: Joustovarojen validointi ja käyttö

- Tässä tarkoitetaan laskettujen joustovarojen validaatiota
 - Historiatatalla
 - Online-käytössä
 - Ennusteet vs. toteutuma
- Käytössä on huomioitava eri markkinoiden (esim. DA, ID) aiheuttamat vaatimukset laskennalle
 - Osa tarvittavasta energiasta hankitaan edellisenä päivänä DA-markkinoilta
 - Loput ID-markkinoilta viimeistään 15 min ennen toimitusta
 - Reaaliaikaiset häiriönkorjaustoimet prosessiin jäljellejääneistä joustovaroista



Käytännössä havaitut haasteet joustovarojen laskennan hyödyntämisessä

- EII-prosessien jatkuvatoimisuus
 - Mittauskampanjan ajoitukselliset haasteet
 - Uusien antureiden asentamisen viiveet
- Prosessimittausten puutteellisuus
 - BOD-mittaukset kerran kolmessa vuorokaudessa
 - Lämpötilamittaukset liian harvassa suhteessa tavoitteisiin
- Sopivan approksimaatiotason löytäminen
 - Paljon mallinnustyötä

Keskustelu

- Kiitokset kuulijoille! Kysymyksiä?