



Hajautettujen resurssien arvon laskenta. INCA

Kirjoittajat: Veikko Kekkonen

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Hajautettujen resurssien arvon laskenta INCA	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Tekesin rahoittama kansallinen tutkimusprojekti	Asiakkaan viite
Projektin nimi INteractive Customer gAteway - INCA	Projektin numero/lyhytnimi 41117 INCA2
Raportin laatija(t) Veikko Kekkonen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 24/
Avainsanat	Raportin numero VTT-R-05372-10
Tiivistelmä <p> Työssä on hahmoteltu malli hajautettujen resurssien arvon mittaamiseksi eri osapuolten kannalta. Osapuolia ovat sähkön tuottajat, tukkumarkkinat, sähkön myyjät/aggregoijat, kantaverkko, jakeluverkko, verottaja ja käyttäjä. Menetelmänä on lineaarinen ohjelmointi muuttuvien kustannusten minimoimiseksi. Menetelmää on demonstroitu KOPTI-ohjelmistolla. Työssä on kehitetty modulaariset mallikomponentit eri osapuolille sekä hajautetuista resursseista tuulivoimalle, vesivoimalle pumppuvoimalle, energiavarastoille sekä varaavalle ja suoralle sähkölämmitykselle. Hajautettujen resurssien käyttö on yleensä kannattavinta käyttäjälle silloin, kun sillä korvataan ostettavaa sähköä. Tehty työ antaa valmiudet jatkaa selvittelyä SGEM-hankkeessa. Mallilla voidaan tutkia erilaisten hajautettujen konseptien rahallisia vaikutuksia eri osapuolille. Hajautettujen resurssien optimaalinen käyttö saattaa lisätä paikallisia tehovaihteluja jakeluverkossa, ja mallilla voidaan tutkia esimerkiksi uusien tehotariffien vaikutusta ilmiöön. </p>	
Luottamuksellisuus	Julkinen
Espoo 31.08.2010 Laatija	Tarkastaja
Veikko Kekkonen erikoistutkija	Pekka Koponen projektipäällikkö
Hyväksyjä	
VTT:n yhteystiedot VTT PL 1000 02044 VTT Puh.: 020 722 6426 email: veikko.kekkonen@vtt.fi	
Jakelu Inca kotisivuilla	
<p style="text-align: center;"> <i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i> </p>	

Alkusanat

Tekes-hanke: INCA – INteractive Customer gAteway.

Osatehtävä 6: Asiakkaan kuorman ohjauksen teknologiset ratkaisut ja markkinapohjaisen ohjauksen liiketoimintamallit.

Alatehtävä 3: Hajautettujen resurssien analysointi aggregaattorin näkökulmasta.

Task: Hajautettujen resurssien arvon laskenta systemaattisin menetelmin.

Taskin tavoite: Perehtyä aihepiiriin ja pohjustaa aiheen työstämistä SGEM-hankkeessa.

VTT:n projektitiedot: 41117 INCA2 ”Interaktiivinen asiakasliityntä ja sen hyödyntäminen sähköjärjestelmän hallinnassa ja ...” Task 1.3 osatehtävä 6 kuor. Projektipäällikkö. Pekka Koponen.

Tämä raportti on lyhennelmä julkaisemattomasta työraportista Kekkonen, Veikko. 2010. Hajautettujen resurssien arvon laskenta. VTT Työraportti. 31.8.2010. Työraportissa on mm. yksityiskohtaiset kuvaukset käytetyistä malleista. Löytyy DoHa:n INCA-projektiaineistokansiossa.

Espoo 25.10.2011

Veikko Kekkonen

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1 Johdanto.....	4
2 Tavoite.....	6
3 Kohteen kuvaus.....	6
4 Menetelmä.....	8
5 Tulokset.....	9
5.1 Kustannusfunktio	9
5.2 Tuotannon mallit	10
5.2.1 Tuulivoima.....	10
5.2.2 Vesivoima, jossa pieni allasvarasto	11
5.2.3 Pumppuvoimalaitos.....	12
5.3 Ohjattavien kuormien mallit.....	15
5.3.1 Lämmitysvarasto.....	15
5.3.2 Suoran sähkölämmityksen ohjaus	15
5.4 Optimaalinen ohjaussignaali	19
6 Tulosten tarkastelu	20
7 Johtopäätökset	21
8 Yhteenveto	22
Lähdeviitteet	22
Kirjallisuus	22

1 Johdanto

Resurssilla tarkoitetaan tässä yhteydessä sähkön tuotantoa tai ohjattavaa kulutusta tai muuta sähkön kulutusresurssia. Resurssi-käsite liittyy läheisesti sähkön tuottamiseen, myös kulutuksen ohjaus, negatiivinen kulutushan vastaa positiivista tuotantoa ja kulutuksen tilapäinen kasvattaminen puolestaan liittyy tasehallinnan välityksellä tuotantoresurssien optimaaliseen hallintaan.

Vaikka täysin hajautettu ja täysin keskitetty ovat ilmiselvästi toistensa vastakohtia, on kuitenkin osoittautunut vaikeaksi määritellä, mitä tarkoitetaan hajautetulla resurssilla. Käänteisestäänkin määritelmästä on apua, jos resurssi voidaan määritellä keskitetyksi, se ei voi olla hajautettu. Vaikka sähköverkko on maantieteellisesti hajautettu niin ”pistetariffijattelun” mukaisesti saman hinnan vyöhykkeellä kaikki on keskitettyä, eli verkon oletetaan olevan saman hinta-alueen sisällä ikään kuin ”äärettömän” vahvan. INCA-rajauksen vuoksi tulee kuitenkin tehdä ero keskitetyn ja hajautetun välillä. Kantaverkko itsessään edustaa ”keskitettyä” ja jakeluverkko on pääosin ”hajautettua”. Sähkön käyttö ja kulutus käyttöpaikkaan sidottuina ovat lähes poikkeuksetta hajautettua, tosin kuitenkin esimerkiksi järjestelmäreserveinä käytetyt suuret ohjattavat kuormat ovat keskitettyjä resursseja. Sähkön tuotanto puolestaan on useimmiten yleensä keskitettyä, paitsi pienimuotoinen tuotanto jakeluverkkoon liittyvänä. Sähkömarkkinalain mukaan pienimuotoisella tuotannolla tarkoitetaan sähköntuotantolaitosta tai usean sähköntuotantolaitoksen muodostamaa kokonaisuutta, jonka teho on enintään 2 MVA. Käytännössä esimerkiksi yhtä yksittäistä tuulimyllyä, vaikka se olisi 2 MW suurempikin, voitaneen pitää hajautettuna yksikkönä, kun taas tuulipuistoa varsinkin kooltaan yli 2 MW tai merituulivoimaa voidaan yleensä pitää keskitettynä resurssina. Mikrotuotanto puolestaan edustaa kiistatta hajautettua resurssia. Sen tyypillisiä ominaispiirteitä ovat alle 43 kW pätöteho pienjänniteverkkoon kytkettynä (3 * 63 A), tai laitteiston nimellistehona alle 50 kVA. Myös pienvoimalan yläraja mainitaan sähköverolaissa [1260/1996], alle 40 MVA puu tai turvelämpövoimalle ja alle 1 MVA vesivoimalle. Tyypillisiä hajautetun tuotannon ominaisuuksia ovat kytkentä jakeluverkkoon ja se, että yksiköt eivät ole suuria. Paikallisuus liittyy myös hajautetun tuotannon energialähteeseen (tuuli, aurinkokeräin, maalämpö, biomassa, biokaasu, pienvesivoima ja paikallisesta lämmöntarpeesta riippuva chp). Paikallisen tuotannon käyttö on niin ikään paikallista (loppukäyttäjä), tai jos tuotantoa tarjotaan markkinoille, toimija on pieni (markkinavoimaltaan 0). DG-GRID hankkeessa rajat ovat korkeammalla, hajautetusta tuotannosta suljetaan pois mm. merituulivoima, geoterminen voima, yli 10 MW vesivoima ja yli 50 MWe chp. Hajautettu tuotanto kuuluu useimmiten ei-päästökauppasektorille.

Tässä työssä eksakti rajanveto keskitetyn ja hajautetun välillä ei ole mitenkään tarpeen. Keskitetty resurssi liitetään mallissa kantaverkkoon ja hajautettu jakeluverkkoon.

Tämän selvityksen kannalta tyypillisiä hajautettuja resursseja ovat esimerkiksi

Kulutusresurssit

- Sähkölämmityksen ohjaus
- Jäähdytyksen ohjaus
- Ilmastoinnin ohjaus
- Tuotantoresurssit
 - Hissin jarrutusenergian talteenotto
 - Pientuulivoima
 - Pienvesivoima
 - Varavoimakoneet
 - Mikrochp
- Varastot
 - Varaajat
 - Patoaltaat
 - Akut
 - Lämmitettävän rakennuksen oma lämpökapasiteetti

Selvityksen tavoitteeksi on asetettu systemaattinen lähestymistapa, mikä toteutuu matemaattisen mallinnuksen avulla. Arvona tarkastellaan ensisijaisesti rahallista (monetaarista) arvoa, käytännössä kustannusta, jota malli minimoi. Tämä selvitys oli helpointa toteuttaa eräällä VTT:llä käytössä olevalla lineaarisen ohjelmoinnin (LP) ohjelmistolla. Silloin arvo ilmenee kustannusfunktion arvona. LP-mallille on tyypillistä, että jokainen kustannuskomponentti edustaa muuttuvia kustannuksia, LP tehtävähän on

Minimize Σcx , subject to $Ax < b$

Käytännössä kaikki kustannukset ovat jollakin aikavälillä muuttuvia. Kuitenkin mallin määrittelyssä otetaan kantaa siihen, millä aikavälillä päätösmuuttujat saavat arvoja. Mikäli resurssin käyttö määritellään hetkellisesti (tuntitasolla), oletetaan yleensä, että esimerkiksi resurssin koko on jo sidottu, eikä resurssin pääomakustannuksiin voida enää vaikuttaa, ne jäävät optimoinnin ulkopuolelle kiinteiksi kustannuksiksi. LP tarkastelua on mahdollista laajentaa niin, että osa muuttujista kuvaa tuntia selvästi pidemmän aikavälin yhteistä tehorajaa, jolle haetaan optimaalista arvoa esimerkiksi tehotariffihinnan perusteella.

Sähkökaupassa päätöksenteon aikajänne on käytännössä muutamasta minuutista ylöspäin, ja on tyypillisesti Suomessa 1 h, mutta pisimmillään kymmeniä vuosia, kun tarkastellaan investointeja sähköjärjestelmään (voimalaitokset ja verkko). Valittu sovellusohjelma (KOPTI) ei valitettavasti tue eri mittaisia aika-askeleita, joten nyt aluksi rajaudutaan vain tunnin askeleella muuttuviin kustannuksiin, pidemmän aikavälin kustannukset tulkitaan kiinteiksi kustannuksiksi, joita ei optimoida. Tuntikustannukset ovat tyypillisesti energiakustannuksia, sitä vastoin jakeluverkon kustannusrakenteessa maksimiteholla on merkittävä rooli.

Monetaarisen arvon lisäksi hajautettujen resurssien käyttöön liittyy muita, mahdollisesti rahan muotoon siirrettävissä olevia arvoja, kuten haittojen minimointi tai sallittavuusrajat. Mittarivalmistajien, sähkön myyjien ja verkonhaltijoiden näkemyksen mukaan [Seppälä ja Koponen 2010] resursseja tulisi voida ohjata nykyisillä mittalaitteilla, eikä lähitulevaisuudessa monipuolistuvien sähkön siirto- ja myyntituotteiden käyttöönottoa pitäisi rajoittaa. Loppukäyttäjällä, joka siis on resurssien kohde, ei aina ole intressiä aktiiviseen osallistumiseen, vaan järjestelmän tulisi toimia mahdollisimman luotettavasti ja

huomaamattomasti. Resurssien käytöstä voi olla konkreettista haittaa, kuten esimerkiksi sähkölämmityksen ohjauksesta aiheutuvaa energian kulutuksen kasvua ja sisälämpötilan liiallista vaihtelua, mikä huonontaa asumismukavuutta. Koposen mallissa / Koponen 2006 / tämä on huomioitu kvadraattisella sakkofunktiolla, joka hinnoittelee haitan, esimerkiksi alilämmön. Sakkofunktio vaatii tehtäväkohtaista virittämistä. KOPTI-malli on puhtaasti lineaarinen, eikä siinä voi käyttää tehokkaampia sakkofunktiota. Tässä työssä ei käytetty lineaarista sakkoo (mahdollisesti SGEM jatkotyössä?), siksi lämmityksenohjauksen jälkihuippua ei esiinny raportoiduissa tuloksissa.

2 Tavoite

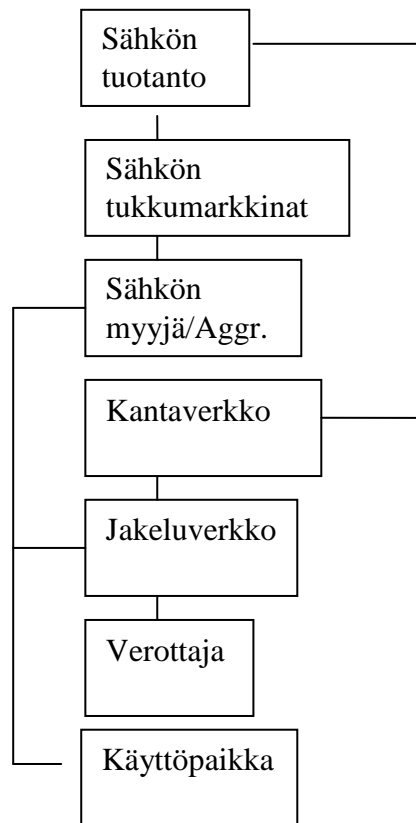
Yleisesti oletetaan, että kysyntäjouaston osuus sähkömarkkinoilla on jäänyt odotettua vähäisemmäksi, mikä saattaa vääristää sähkömarkkinoita. Hajautettujen joustokohteiden lisääntyminen siis mahdollisesti parantaa sähkömarkkinoiden toimivuutta ja mahdollisesti alentaa sähkön hintaa. Samoin oletetaan, että hajautettu tuotanto on arvokasta, koska se tuo lisää tuotantokapasiteettia markkinoille.

Työn ensisijaisena tavoitteena on perehtyä hajautettujen resurssien arvon määrittämiseen systemaattisin menetelmin. Työtä on tarkoitus jatkaa SGEM-hankkeessa. Lisätavoitteena SGEM-hankeessa on tutkia erilaisia siirtotariffirakenteita, joilla hajautettujen resurssien hyötyjä ja haittoja pystytään paremmin tasapainottamaan etenkin jakeluverkon kannalta.

3 Kohteen kuvaus

Kuva 1 esittää mallin toimijoiden väliset riippuvuussuhteet.

Hajautettu resurssi (tuotanto ja/tai kulutus ja/tai varastointi) sijaitsee jakeluverkkoon liitettyssä käyttöpaikassa.



Kuva 1: Muuttuvien kustannusten muutoksien läpimeno mallissa, kun käyttöpaikalla tapahtuu tehomuutos. Käyttöpaikka kuvaa hajautettua resurssia.

Hajautetun kohteen lisäksi mahdollisia tarkasteltavia toimijoita ovat kuvan 1 mukaisesti

- Sähkön (keskitetty) tuotanto
- Sähkön tukkumarkkinat
- Sähkön vähittäismyynti ja/tai aggregaattoritoiminta
- Sähkön keskitetty siirto
- Sähkön jakelu
- Verotus

Mallin taseet kuvaavat sitä, miten käyttöpaikalla tapahtuva tehonmuutos menee järjestelmän läpi ja mallin kustannusfunktio ja erilliset kustannustaseet kuvaavat eri osapuolten voittoja/tappioita.

Käytännön vaikeutena on erotella eri toimijoille kohdistuvat kustannukset mallissa toisistaan siten, että niitä ei mallinnettaisi päällekkäisiksi. Sähköenergian suhteen tarkastelu voidaan tehdä joko loppukäyttäjän tai sähkön myyjän/aggregaattorin näkökulmasta.

Mallissa kustannukset muuttuvat energian suhteessa (jokainen tuntiteho otetaan huomioon). Kustannuslaskennan kannalta toimintaan liittyy sekä menoja että tuloja. Kustannuksia minimoivassa LP-mallissa tulo on negatiivinen kustannus. Tehon suhteen muuttuvat kustannukset tulisi LP-mallissa kohdistaa tehorojoihin, jotka niinkään optimoitaisiin, mutta pidemmällä jaksolla kuin yksi tunti. KOPTI-ohjelmistolla ei kuitenkaan vielä voida rakentaa tällaista mallia. Jakeluverkon kustannukset kohdistuvat kuitenkin enemmän tehoon kuin energiaan. Edelleen laajennettuna mallin pitäisi myös mitoittaa tehorojat laiteinvestointien (laitteiden koon) perusteella.

Hajautettuina resursseina tarkastellaan mm.

- Tuulivoima
- Vesivoimaa, jossa pieni allasvarasto
- Pumppuvoimalaitosta energiavarastona
- Sähkölämmitysvarastoa yleensä (varaava sähkölämmitys)
- Lämpötilavarastoa (suoran sähkölämmityksen ohjaus)

4 Menetelmä

Systemaattisena menetelmänä käytetään lineaarista ohjelmointia (LP), ja mallinnusympristönä KOPTI-ohjelmistoa. Ohjelmisto ei tue MIP-muuttujia (Mixed Integer Programming).

Tavoitteena on käyttää systemaattisia menetelmiä hajautettujen resurssien arvon määrittämisessä. Aluksi menetelmäksi valitaan lineaarinen ohjelmointi (LP), jossa tutkittavat resurssit kuvataan lineaarimallin avulla. Mallin tavoitefunktio koostetaan muuttuvista kustannuksista, joita minimoidaan, joten tavoitefunktion arvon avulla voidaan havainnoida resurssien arvoa eri tilanteissa.

Tässä INCA-alitehtävässä laskenta suoritetaan VTT:n KOPTI mallilla, jossa erilaisista tyyppikomponenteista voidaan koostaa tutkittava järjestelmä. Ohjelmisto rakentaa tutkittavasta ongelmasta dynaamisen LP-tehtävän ja ratkaisee sen. Menetelmä on alun perin tarkoitettu sähkön ja lämmön yhteistuotannon käytön optimointiin varastot huomioiden. Laskentatehtävä koostuu perättäisistä tunneista, joita voi olla paljon. Yhtenä komponenttina on yksinkertainen lineaarinen yhden tunnin askeleella toimiva energiavarasto.

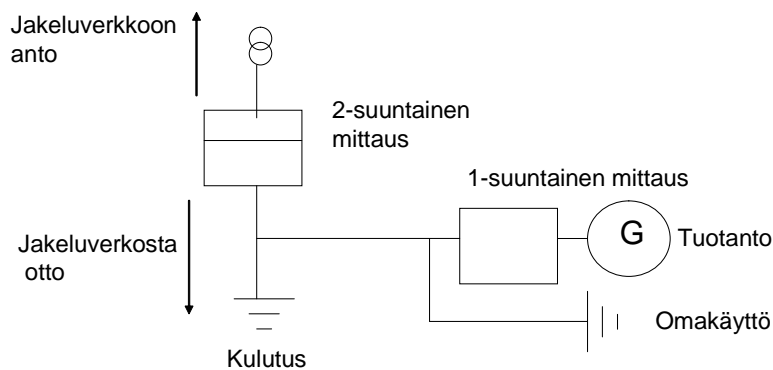
Malli on mahdollista ratkaista vaihtoehtoisilla solvereilla, joista eräs tässä yhteydessä mielenkiintoinen on VTT:n kehittämä DLP-algoritmi /Tamminen 1979 ja 1991 /. Siinä pitkä aikaväli dekomponoidaan yhden tunnin tehtäväksi joka ratkaistaan duaali/primaali mallien avulla iteratiivisesti. Algoritmin heikkoutena on epävarma konvergenssi ja vahvuutena varaston duaaliarvon käsittely. Itse asiassa KOPTI-menetelmä on huonosti konvergoivan DLP-algoritmin korvaamiseksi kehitetty kiertotie, jossa yhden aika-askeleen malli monistetaan koko jakson käsittäväksi suureksi LP-malliksi, joka on ratkaistavissa standardisolveilla.

5 Tulokset

5.1 Kustannusfunktio

Lineaarimallissa jokaiselle päätösmuuttujalle voidaan asettaa kustannusfunktiokerroin. Tässä selvityksessä muodostettu mallirakenne tukee tarkastelua eri osapuolten näkökulmasta. Lähtökohtana on käyttöpaikalla tapahtuva tuntitehonmuutos, joka vaikuttaa kaikilla mallin tasoilla.

Mikäli kysymys on hajautetusta tuotannosta, nettotehonmuutoksen asemesta on selvitettävä, miten muutos kohdistuu jakeluverkosta ottoon ja antoon. Mallin pohjana on kuvan 2 mukainen mittauskytkentä. Mikäli myös tuotannon omakäyttö halutaan ottaa huomioon, tulee se mitata erikseen.



Kuva 2. Hajautetun tuotannon mittaus.

Seuraava esimerkki kuvaa, miten lp-mallissa nettoteho jaetaan otoksi ja annoksi:

```

min
Obj: 0.0001 otto #Estetään kierto
subject to
    tase: nettoteho-kulutus+tuotanto=0
    netotus: otto-anto-nettoteho =0
bounds #Tässä esimerkissä
    kulutus = 10
    tuotanto = 17
    nettoteho >- 100 #Korvaa oletusalarajan
end
    
```

Kun otto ja anto on mallissa eritelty, ne voidaan siirtää eri muuttujille ja kohdistaa niihin kustannusfunktio kertoimet. Toimijoittain muuttuvia kustannustekijöitä ovat tuntitasolla mm.:

- Tuotannossa yleensä (sekä keskitetty että hajautettu)
 - Tuotannon muuttuvat kustannukset vähennettynä mahdollisilla tuilla
- Tukkumarkkinoilla
 - Markkinahinta
- Energian vähittäismyynnissä
 - Menona markkinahinta
 - Menona pientuotannon ostohinta
 - Tulona myyntitariffin muuttuva osa
- Kantaverkossa
 - Ottomaksu
 - Antomaksu
 - Kulutusmaksu
- Jakeluverkossa
 - Verkosta otto: siirtomaksun muuttuva osa
 - Verkkoon anto: pientuotannon verkkoonantomaksu
- Verotuksessa
 - Sähkövero + alv
 - Siirron alv
- Käyttöpaikalla
 - Tuloina pientuotannon verkkoonantomaksu ja energian myynti
 - Menoina energiamaksu+alv, siirtomaksu+alv ja sähkövero

Mallinnuksessa on kaikin tavoin pyrittävä välttämään sellaista virhetilannetta, jossa sama tekijä kertautuu monta kautta kustannusfunktioon.

Mallilaskennan tulos tuottaa kustannusfunktion minimin tai maksimin, KOPTI:ssa kustannusten minimin. Mallinnuksessa voidaan lisäksi pyytää osapuolittain hyötyjen ja haittojen summat.

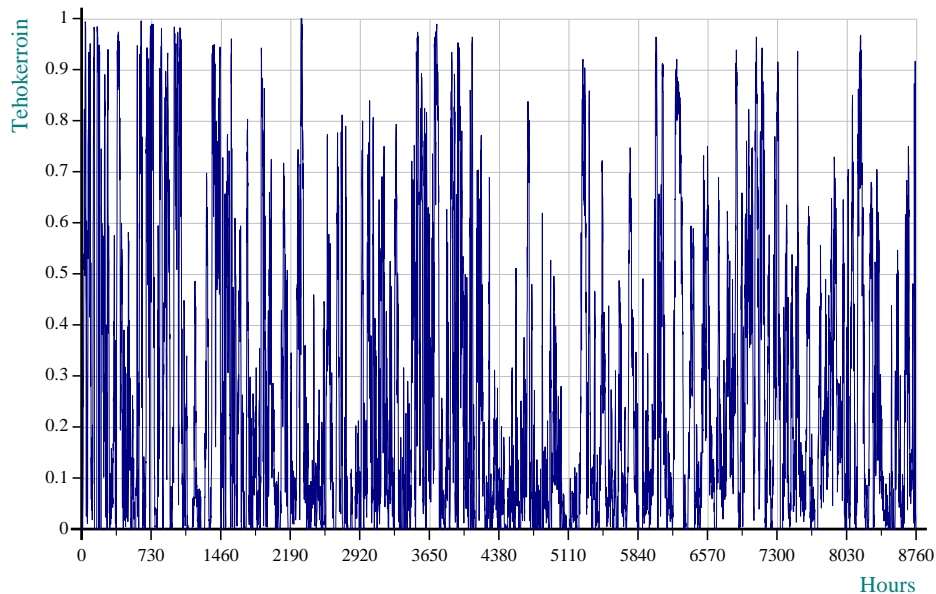
5.2 Tuotannon mallit

5.2.1 Tuulivoima

Tuulivoimaa tuotetaan, kun sitä saadaan, sen käyttöpäättöksen suhteen ei ole mitään optimoitavaa. Sama koskee myös esimerkiksi suoraa vesivoimaa, eli ns pakkovesivoimaa. Aggregaattorin tasolta katsottuna tuuli- ja pakkovesivoimaa kannattaa joskus ohjata hetkellisesti alaspäin, Mallilla voidaan tutkia esimerkiksi tuulivoiman kannattavuutta eri toimintaympäristöissä. Yleisesti hajautettu tuotanto on sitä kannattavampaa mitä enemmän sitä voi kattaa omaa kulutusta, jolloin tuottaja/kuluttaja voi välttyä energia ja siirtomaksuista ja mahdollisesti veroista. Mallissa tuulituotantokomponenttia voi tutkia mm. energiavaraston ja muun kulutuksen yhteydessä.

Kuvassa 3 on eräs tuulituotantoaikasarja mallille annettuna vakiona.

TUULIVOIMA



Kuva 3. Tuulivoiman tuotannon vuosiaikasarja (esimerkki). Pystyakselilla tuntitehon suhde nimellistehoon.

5.2.2 Vesivoima, jossa pieni allasvarasto

Kaikki KOPTI-mallin energiavarastot perustuvat lineaariseen yhden askeleen (tunnin) dynaamiseen tilan siirrosehtoon (1):

$$x_{t+1} = ax_t + s_t + u1_t - u2_t + \text{ylivirtaus}_t \quad (1)$$

Missä

x on tilamuuttuja

t on aikaindeksi

a on talteenottokerroin (1 – hävikkikerroin)

s on tulovirtaama (vakio)

$u1$ on latausmuuttuja

$u2$ on purkausmuuttuja

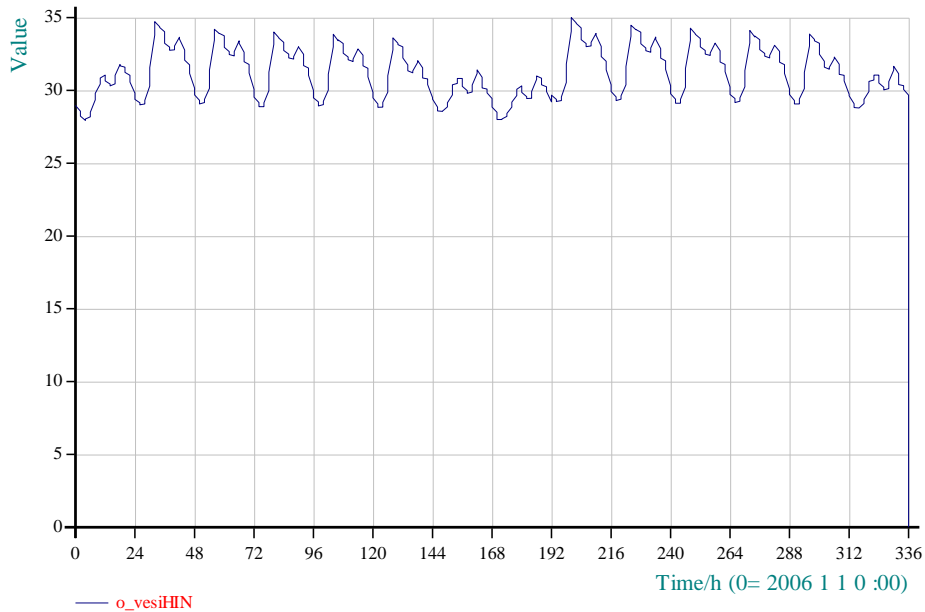
ylivirtaus on poistumamuuttuja

Lineaarimallille tyypillisesti kaikki muuttujat ovat ala- ja ylärajoitettuja ja niille voidaan kohdistaa kustannusfunktiokerroin. Lisäksi tilamuuttujalle voidaan antaa erilliset alku- ja loppukustannukset (joko positiivisia tai negatiivisia).

Tulovirtaama puolestaan on ajasta riippuva vakio, siihen ei kohdistu päätöksiä.

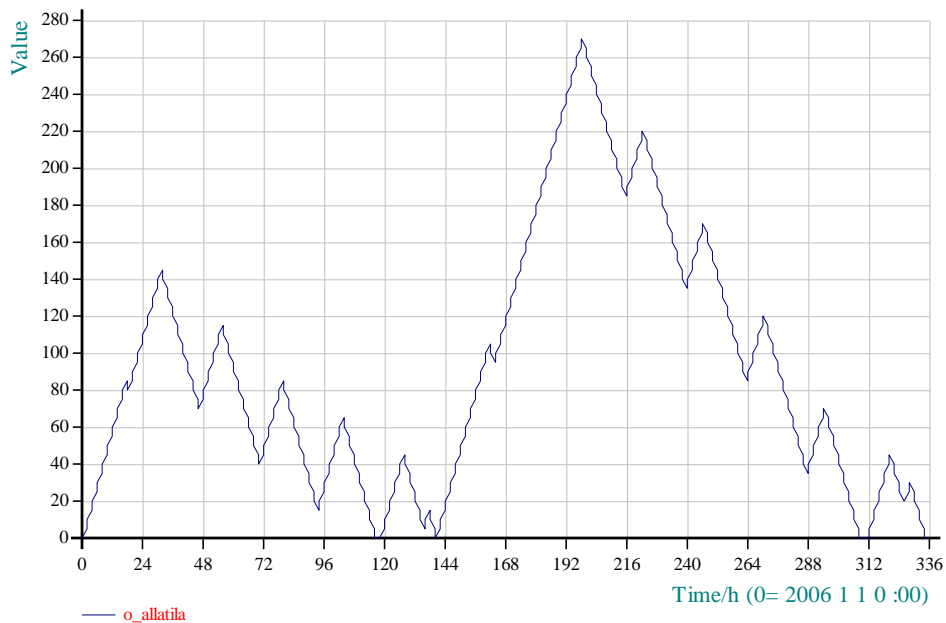
Mallin käyttäytyminen riippuu täysin sille annettavista parametreista. Esimerkiksi kuvan 4 mukaisella ohjaavalla hinnalla on eräällä voimalaitos/allasyhdistelmällä saatu kuvan 5 mukainen tulos.

1. 1.2006 Sun A time serie from a file o_vesiHIN



Kuva 4. Esimerkki ohjaavasta hinnasta, pystyakselilla €/MWh.

1. 1.2006 Sun A time serie from a file o_allatila



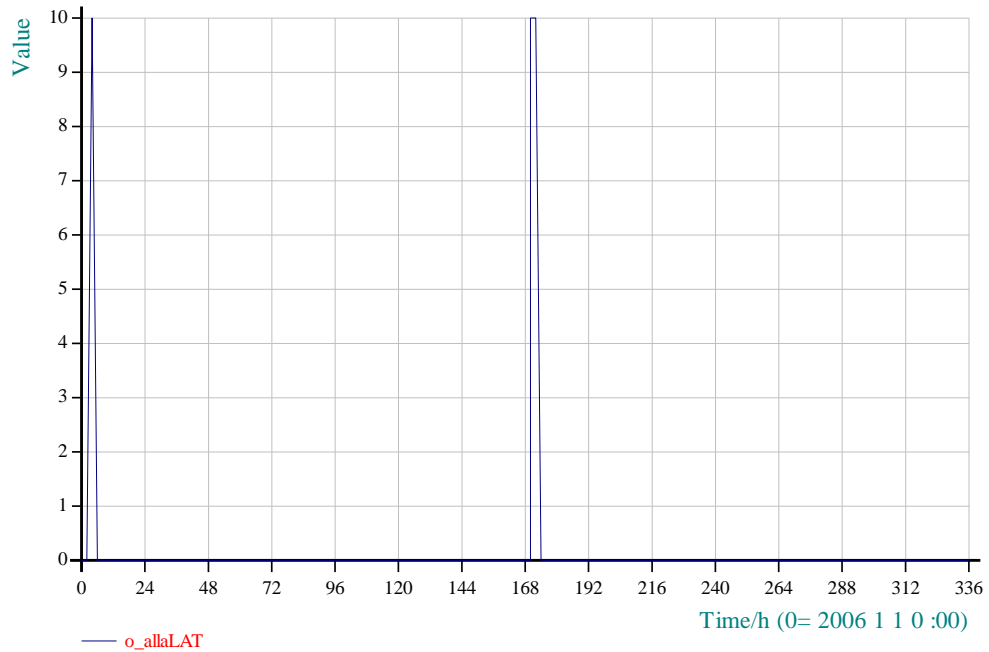
Kuva 5. Esimerkki äärettömän, alussa tyhjän altaan optimaalisesta käytöstä kuvan 4. ohjaavalla hinnalla. Pystyakselilla on varastossa oleva energiamäärä, MWh. Voimalan teho on 10 MW ja joen tulovirtaama 5 MWh/h. Tässä tapauksessa täysimääräinen varastokapasiteetti vastaisi 54 h tulovirtaamaa.

5.2.3 Pumppuvoimalaitos

Pumppuvoimalan malli perustuu yhtälöön (1), kun latauksen u_1 yläraja > 0 . Vesivoimalaitoksen osalta on kuitenkin todettava, että saadun ja käytetyn energian suhde jää häviöiden vuoksi käytännössä niin alhaiseksi, että tavanomainen sähkön

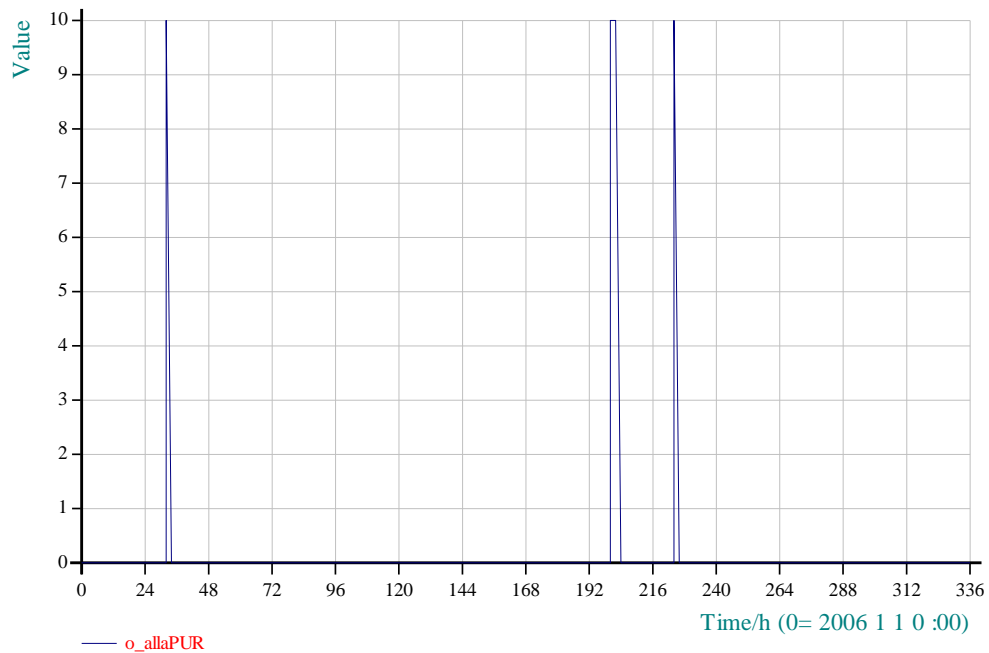
hinnan vuorokausivaihtelu ei riitä aktivoimaan voimalan käyttöä. Kuvissa 6 ja 7 on kuvan 4 mukaisella hinta-aikasarjalla saatu optimaalinen käyttö, kun voimalan kiertohyötysuhde on epärealistisen korkea 85 %.

1. 1.2006 Sun A time serie from a file o_allaLAT



Kuva 6. Sähköenergiavaraston lataus, energiahyötysuhde 85 %. Pystyakselilla teho, MW. Sähkön hinta kuvan 4 mukainen

1. 1.2006 Sun A time serie from a file o_allaPUR



Kuva 7. Sähköenergiavaraston purkaus kuvan 6 tapauksessa. Pystyakselilla teho, MW.

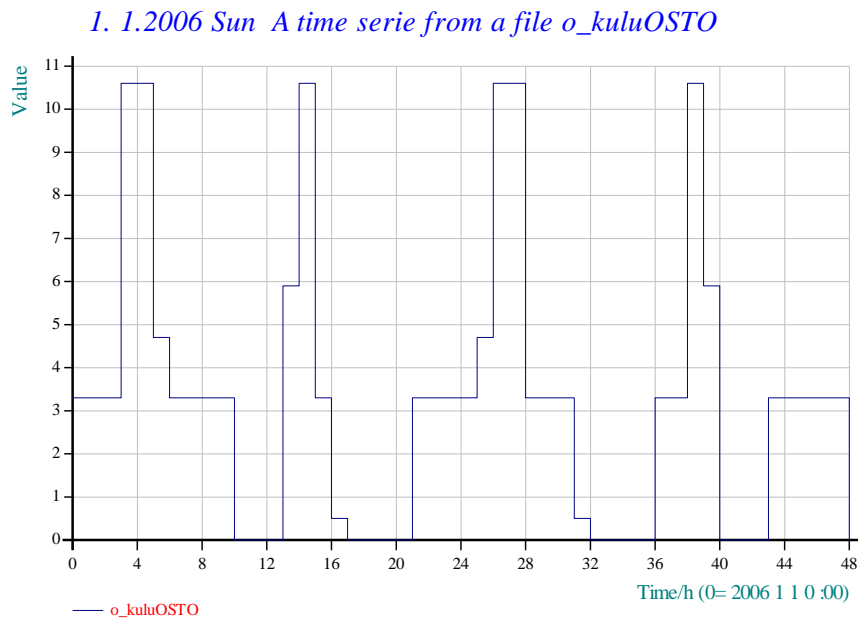
Pumppuvoimalaa käytetään vielä kohdassa 5.4 demonstroimaan ohjaussignaalia.

5.3 Ohjattavien kuormien mallit

5.3.1 Lämmitysvarasto

Lämmitysvarastolla tarkoitetaan tässä yhteydessä energiavarastoa, joka toimii puskurina suoran lämmityskuorman ja sähköverkosta otettavan tehon välillä. Epätavallinen termi viittaa siis KOPTI mallin varastokomponenttiin. Se kuvaa lähinnä ideaalista täysin varaavaa (sähkö)lämmitysjärjestelmää.

Kuva 8 esittää tapausta kuvan 4 sähkön hinnalla, kun vakio lämmitystarve on 3,3 kW ja lisäksi on käytettävissä varaaja 16 kWh varaustehona 7,3 kW ja purkutehona 5 kW.



Kuva 8. Esimerkki täysin varaavan lämmitysjärjestelmän optimaalisesta sähkökäytöstä. Pystyakselilla sähköteho, kW.

Kuvasta 8 nähdään, että sähkön tukkuhinnan kannalta optimaaliseen varaajan käyttöön liittyvät erittäin jyrkät ja mahdollisimman korkeat tehoiikit.

5.3.2 Suoran sähkölämmityksen ohjaus

Edellä mainitut osamallit käsittelevät suoraan energiaa. Suoran sähkölämmityksen mallinnus helpottuu, kun mukaan otetaan lämpötilan ja energian vastaavuus.

Tarkastellaan mallia

$$aT - bu = 0 \quad (2)$$

Missä

a on lämpöhäviövakio, välillä 0 ... 1

T on lämpötilaero sisä- ja ulkolämpötilan välillä
 b on muunnosvakio
 u on sähkölämmitystehomuuttuja, jolla korvataan lämpöhäviö

T on mallissa dynaaminen tilamuuttuja:

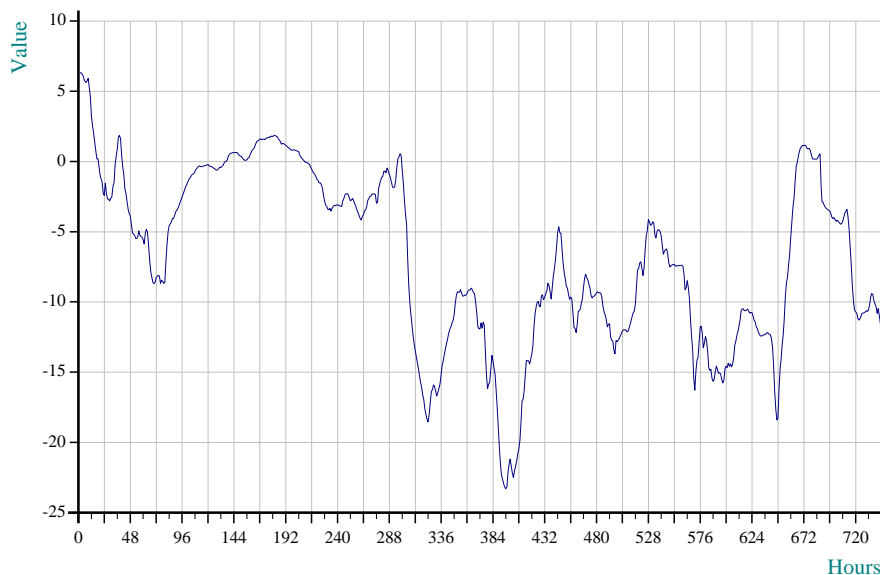
$$T_{t+1} = (1-a)T_t \quad (3)$$

Tehdään esimerkkiparametrointi ulkolämpötilassa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpötila tulkitaan lämpövarastoksi, josta tapahtuu lämpöhäviötä ympäristöön. Tilan ala ja ylärajat ovat mallille annettavia lähtötietoja, esim. 20 ja $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, samoin alkutila on valittava laskennan lähtötiedoksi, esim. $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mitoitetaan mallin lämpöhäviö siten, että oletetaan sisälämpötilan laskevan $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$, jos systeemiin ei tuoda energiaa ja ulkolämpötila on $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dynaamisen lämpötilavaraston dimensioton häviökerroin a on siis $0,5/20 = 0,025$. Tuodaan systeemiin sähköenergiaa korvaamaan lämpöhäviö. Oletetaan, että tarvittava lämmitysteho $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sisälämpötilassa ja vallitsevassa tasaisessa $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulkolämpötilassa on 3 kW . Tällä jatkuvalla teholla korvataan jatkuva $0,5\text{ }^{\circ}\text{C/h}$ sisälämpötilan lämpöhäviö, eli muunnosvakio b on $0,5\text{ }^{\circ}\text{C} / 3\text{ kW} = 0,167\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{kW}$.

Mallin kannalta jatkuvasti muuttuva ulkolämpötila on annettu lähtötieto. Jos esimerkiksi ulkolämpötila onkin $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ asemesta $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, tämä $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ulkolämpötilamuutos poistaa ”normisisälämpötilasta” $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ kahdeskymmenesosan, eli $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Näin yhtälöä (1) noudattava lineaarimallirakenne saadaan seuraamaan annettua ulkolämpötilaa syöttämällä celsiusasteissa ilmoitettu ulkolämpötila-aikasarja tulovirtaaman arvoksi kertomalla ulkolämpötila vakiolla (tässä esimerkissä $0,05$).

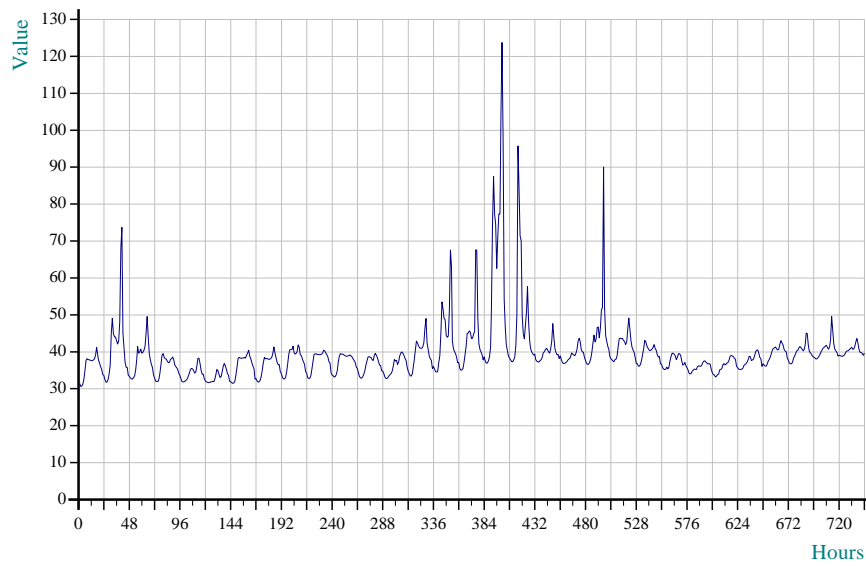
Mallia testattiin joulukuun 2009 ulkolämpötilalla (kuva 9) ja sähkön systeemihinnalla (kuva 10).

Joulukuu 2009 Ulkolämpötila astC



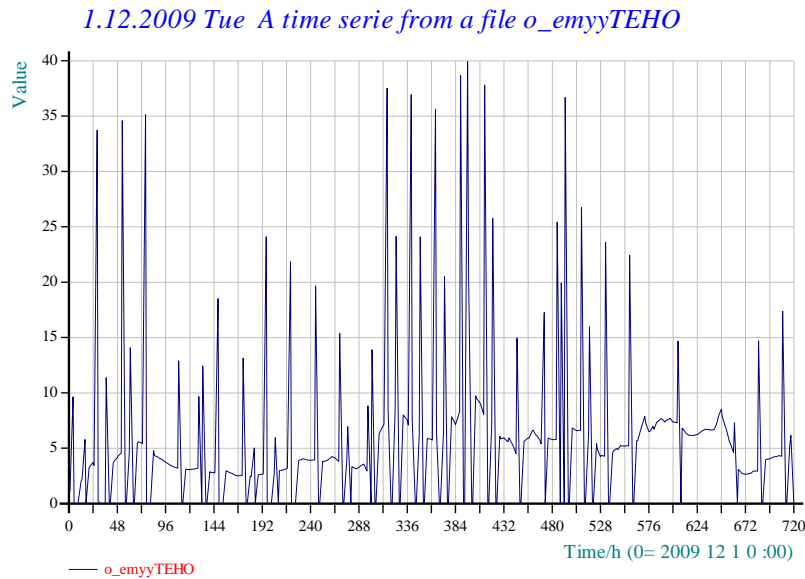
Kuva 9. Esimerkissä käytetty ulkolämpötila-aikasarja, $^{\circ}\text{C}$.

Joulukuu 2009 Systemihinta, EUR/MWh

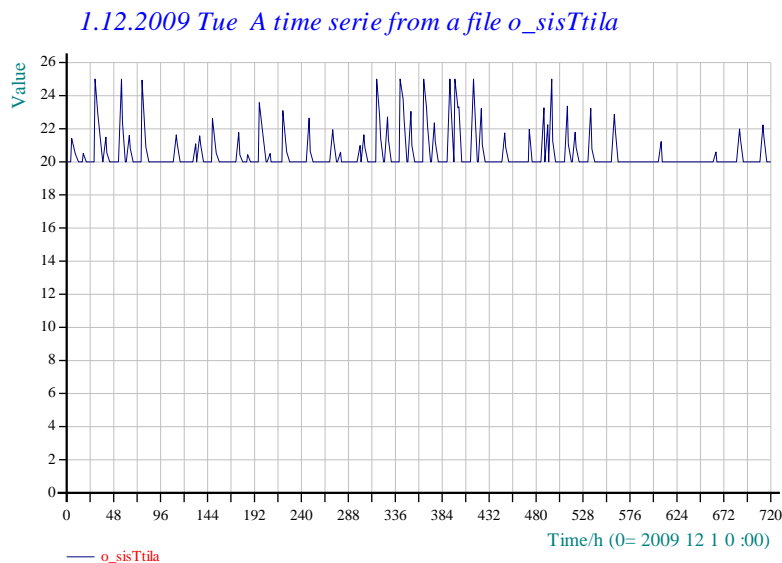


Kuva 10. Nord Pool systemihinta joulukuussa 2009, €/MWh.

Edellä mainituin parametrein ja rajoittamattomalla lämmitystekolla saadaan kuvan 11 mukainen optimaalinen tehon käyttö, joka vastaavasti tuottaa kuvan 12 mukaiset sisälämpötilat.



Kuva 11. Optimaalinen rajoittamaton sähkölämmitysteho, kun tehontarve 0 C ulkolämpötilassa on 3 kW, ulkolämpötila on kuvan 9 mukainen ja sähkön hinta on kuvan 10 mukainen. Pystyakselilla kW.



Kuva 12. Sisälämpötila kuvan 11 tapauksessa. Pystyakselilla °C.

Kuvasta 11 voidaan havaita n. 5 kW tasolla vaihteleva peruslämpöteho, joka nostovaiheessa n. viisinkertaistuu ja laskuvaiheessa putoaa hetkellisesti nolnaan.

Resurssin arvo saadaan vertaamalla mallin kustannusfunktion arvoa ilman ohjausta ja ohjauksen kanssa. Joulukuun esimerkkitapauksessa ohjaus säästi myyjän ostokuluja 2,6 %. Jos asennettu lämmitysteho olisi pienempi, jäisi myös hyöty pienemmäksi. On selvää, että näin pieni säästö ei kata lisätehon investointikustannuksia, se tuskin kattaisi edes suurempaa sulakeperusteista siirron kuukauden perusmaksua. Tämä on tyypillistä monille hajautetuille resursseille. Kirjoittajan näkemyksen mukaan monien hajautettujen resurssien

säästöpotentiaali saattaa joskus jäädä niin pieneksi, että se ei aina välttämättä riitä kattamaan investointikustannuksia.

Sinänsä kovin elegantti ideaalimalli kelpaa vain karkeaan demonstrointiin, ei tositehtävissä käytettäväksi, koska siinä on mahdollisen lineaarisointivirheen lisäksi pahimpana epäkohtana sisälämpötilan alaraja, jonka alle mallia ei saa pakotettua, joten suoran sähkölämmityksen ohjauksessa niin tyypillinen jälkihuippuilmio jää kokonaan pois tästä mallista. On esitetty muita malleja / Koponen 2006 /, joissa alhaisten sisälämpötilojen rankaiseminen kvadraattisella sakkofunktiolla on kuvannut tilannetta tyydyttävällä tavalla. Toinen epäkohta liittyy KOPTI ohjelmiston vaajaavuuksiin, toisiinsa kytkettyjä lämpötilavarastoja ei voi toistaiseksi mallintaa. Jo muutamalla yhteen kytketyllä lineaarisella lämpötilamallilla on saatu aikaan lupaavia tuloksia / Koponen 1997 ja 2006 /.

Laittamalla lineaarimalliin sisälämpötilasta riippuvan lineaarisen kustannustermin saa sisälämpötilan asettumaan ylärajalleen muutoin kuin korkean hinnan aikaan, jolloin se tippuu kohti alarajaa. Tuo kustannustermi pitäisi määrittää optimoitavan jakson hinnan keskiarvosta riippuvaksi. Mallilla saataisiin siis joko etuhuippuja (kuten esimerkissä) tai jälkihuippuja, mutta huonosti molempia samassa ratkaisussa. Kustannustermin virittämistä on syytä kokeilla SGEM-jatkohankkeessa.

5.4 Optimaalinen ohjaussignaali

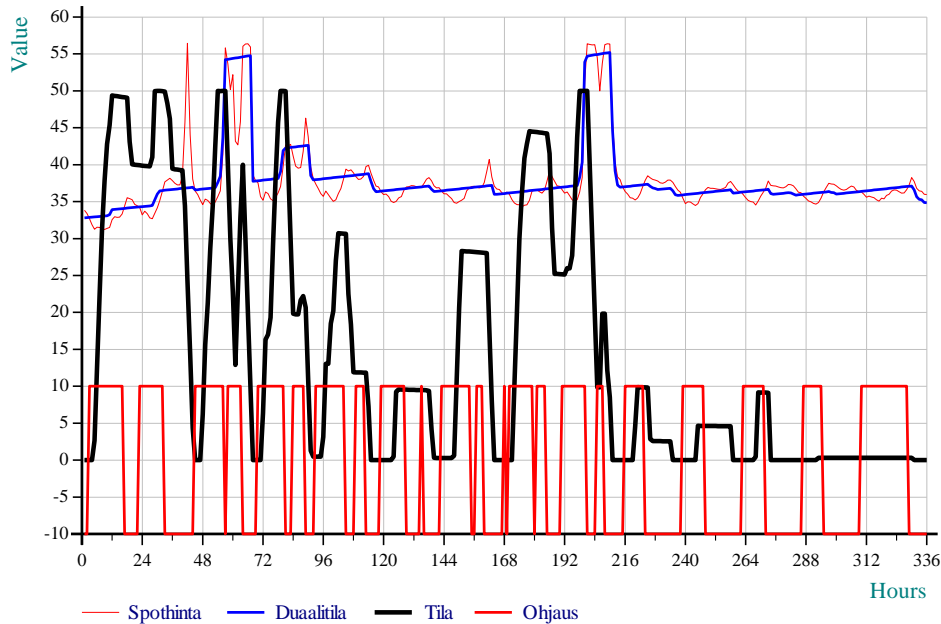
Dynaamisen mallin optimaalisen liittotilan tiedetään kuvaavan varastoresurssin arvoa¹ / Tamminen 1991 ja 1992 /. Mikäli ulkoinen energia (esim. spot-hintainen sähkö) on halvempaa kuin liittotilan arvo, varasto on ulkoista energiaa arvokkaampaa ja siihen kannattaa ostaa halvempaa ulkoista energiaa. Varastoa kannattaa siis silloin täyttää, ja optimaalinen ohjaussignaalin arvo on ”lataa”. Päinvastaisessa tapauksessa ulkoinen energia on liittotilaa kalliimpaa, jolloin varastoa kannattaa tyhjentää ja säästää ulkoista energiaa, ohjaussignaalin arvo on ”pura”.

KOPTI-ohjelmistossa on DLP-niminen primaali/duaali dekompositioon / Tamminen 1979 /perustuva ratkaisualgoritmi, jolla voi demonstroida yllä mainittua hypoteesia. Malliksi on otettu luvun 5.2.3 pumppuvoimalaitos, jossa sähköä voi varastoida häviöllisesti. Valitettavasti DLP-algoritmi konvergoi huonosti, varsinkin näin pelkistetyssä tehtävässä.

Kuvassa 13 on pumppuvoimalaa ajettu systeemihinnalla minimoiden sähkön ostokustannuksia. Hyvän vasteen saamiseksi kierto-häviö on pieni, mutta sen lisäksi konvergenssin parantamiseksi varastosta tapahtuu vähäistä häviötä ulkoilmaan (tila pienenee ”itsestään”, mutta duaaliarvo nousee).

¹ Jos malli optimoi euromääräisiä kustannuksia, ja tilan yksikkö on MWh ja päätösmuuttujan yksikkö on MWh/h, niin liittotilan yksikkö on €/MWh, samoin kuin tilan ala- ja ylärajojen Lagrangen kertoimien, jotka ”ohjaavat” duaalista liittotilaa samalla tavoin, kuin lataus- ja purkausmuuttujat ”ohjaavat” primaalista varastotilaa.

Pumppuvesivaraston tila / duaalitila



Kuva 13. Duaalitilan ja spothinnan ero varaston käytön ohjaajana. Pystyakselilla spothinta ja duaalitila €/MWh, tila kWh ja ohjaus: 10 = lataa, -10 = pura.

Koska algoritmi ei ole konvergoinut täydelliseen optimiin, kuvan 13 tila ja duaalitila eivät täysin vastaa toisiaan, mikä näkyy ohjauksen ja tilan välisestä ristiriidasta jakson loppuosassa.

Esimerkkitapauksen valossa on ilmeistä, että optimaalinen ohjaussignaali riippuu täysin yksilöllisistä parametreista. Ohjaus tulee siis lähettää kullekin kohteelle yksilöllisesti, ei broadcastina. Ulkoisen järjestelmän lienee kuitenkin vaikea ajoittaa yksilöllistä ohjausta oikein. Sen sijaan parempaan tulokseen päästäisiin lähettämällä sähkön hinta-aikasarja etukäteen tiedoksi, jolloin paikallisen järjestelmän tehtävänä on ohjautua optimaalisesti.

Mikäli aggregaattori pyrkii hakemaan hyötyä säätö- ja tasesähkömarkkinoilta, saattaa yleinen nosta/laske broadcast-ohjaussignaali tulla kysymykseen. Ohjausvasteen ennustaminen voi kuitenkin olla hankalaa.

Olipa ohjaussignaali minkäläinen tahansa, aggregaattori joutuu joka tapauksessa ennustamaan ohjausvasteen, mittaamaan sen toteutuvuuden ja mahdollisesti korjaamaan ohjausta. Kirjoittajan oma näkemys on, että näissäkin toiminnoissa on vielä runsaasti kehitettävää.

6 Tulosten tarkastelu

Työssä on perehdytty hajautettujen resurssien ongelmakenttään. Pyrkimyksenä on lähestyä kysymystä, miten hajautettujen resurssien arvo määritellään optimoitaessa hajautettujen resurssien käytön ohjausta. Työssä on selvitetty käyttöpaikalla tapahtuvan tehonmuutoksen välittömiä muuttuvia kustannusvaikutuksia, jotka kohdistuvat siirtomaksuihin ja veroihin sekä energiamaksuihin. Energiamaksuissa

on vaihtoehtoina vähittäismyyntitariffi tai tukkumarkkinoiden spothinta. Tehomuutos ja sen välittömät kustannusvaikutukset eri osapuolille on mallinnettu lineaarisella KOPTI-optimointiohjelmistolla, johon on muodostettu seuraavia mallikomponentteja:

- Pienvesivoimalaitos ja varastoallas, ohjattava
- Pumppuvoimalaitos, ohjattava
- Tuulivoimalaitos, ei ohjattava
- Lämmityskuorman vuorokausivaraaja, ohjattava
- Suoran sähkölämmityksen ohjaus, ohjattava

Hajautetun tuotannon tai varaston arvo on suurimmillaan, kun sillä korvataan oman sähkön oston muuttuvia kustannuksia.. Optimoiva malli tuottaa spothinnan suhteen mielekkäitä ohjaussignaaleja. Ei ohjattava tuulivoima puolestaan tarvitse rinnalleen ohjattavia komponentteja lisätäkseen arvoaan. Yksi mallikomponentti kohdistaa tehomuutoksen kustannusvaikutukset eri osapuolille, kuten jakeluverkonhaltijalle, energianmyyjälle ja verottajalle.

Edellä mainittuja mallikomponentteja voi suoraan hyödyntää SGEM-hankkeessa, kun määritellään tarkemmin optimiohjauksen toteutusta ja tarkastellaan erilaisia siirtotariffiratkaisuja erilaisissa skenaarioissa. Tarkoitus on laajentaa ja syventää oheisen INCA-työraportin sisältöä SGEM-hankkeessa.

7 Johtopäätökset

Tehdyn KOPTI-mallihahmotelmaa on mahdollista syventää, ja sen jälkeen laskea sopivia tyyppiesimerkkejä hajautettujen resurssien hyödyistä ja haitoista eri osapuolille (SGEM-hanke). Mallirajoituksista (täysin lineaarinen) johtuen KOPTI:lla tuskin voidaan laskea kunnolla suoran tai osittain varaavan sähkölämmityksen ohjausta, mutta KOPTI:ssa kehitetyt yksinkertaiset lineaarirakenteet ovat mahdollisesti siirrettävissä muihinkin ympäristöihin, joita kannattaa kokeilla SGEM-hankkeessa. Toki lineaarista sakkofunktiota kannattaa kokeilla suorassa sähkölämmityksessä, mutta osittain varaavien sähkölämmityskohteiden sekä kylmävarastojen lämpötilojen optimointiin malli sen sijaan soveltuu huonosti, jos ei löydetä keinoa, jolla saadaa sekä etukäteen varastointi että jälkihuippu samalle varastolle samaan ratkaisuun. Usean lämpötilavaraston yhteenkytkentä on kenties mahdollista ratkaista KOPTI:ssa uudelleenohjelmoinnin keinoin.

Kuvista 3, 8 ja 11 voidaan tehdä johtopäätös, että optimaalinen hajautettujen resurssien käyttö on omiaan lisäämään tehovaihteluja ja saattaa saada aikaan erittäin piikikästä tehokuormaa, mikä ei ole hyvä jakeluverkon näkökulmasta. Siksi SGEM-hankkeessa yhtenä tavoitteena on etsiä ratkaisuja tehopiikkien hillitsemiseksi, kuten esimerkiksi siirtomaksujen painottaminen tehoperusteisesti. KOPTI:n jatkoversion tarjontaa mm. mielivaltaisen jakson (kuitenkin jatkuvan?) tehokomponentin optimointimahdollisuuden.

8 Yhteenveto

Työssä on hahmoteltu malli hajautettujen resurssien arvon mittaamiseksi eri osapuolten kannalta. Osapuolia ovat sähkön tuottajat, tukkumarkkinat, sähkön myyjät/aggregoijat, kantaverkko, jakeluverkko, verottaja ja käyttäjä. Menetelmänä on lineaarinen ohjelmointi muuttuvien kustannusten minimoimiseksi. Menetelmää on demonstroitu KOPTI-ohjelmistolla. Työssä on kehitetty modulaariset mallikomponentit eri osapuolille sekä hajautetuista resursseista tuulivoimalle, vesivoimalle pumppuvoimalle, energiavarastoille sekä varaavalle ja suoralle sähkölämmitykselle. Hajautettujen resurssien käyttö on yleensä kannattavinta käyttäjälle silloin, kun sillä korvataan ostettavaa sähköä. Tehty työ antaa valmiudet jatkaa selvittelyä SGEM-hankkeessa. Mallilla voidaan tutkia erilaisten hajautettujen konseptien rahallisia vaikutuksia eri osapuolille. Hajautettujen resurssien optimaalinen käyttö saattaa lisätä paikallisia tehovaihteluja jakeluverkossa, ja mallilla voidaan tutkia esimerkiksi uusien tehotariffien vaikutusta ilmiöön.

Lähdeviitteet

Koponen, Pekka. 1997. Sähkölämmityskuorman suoran ohjauksen mallit. Tekes, EDISON. VTT raportti ENE6/9/97.

Koponen, Pekka. 2006. Pientalojen varaavan sähkölämmityksen hintaohjauksen simuloidut hyödyt.. Tutkimusraportti Nro VTT-R-05475-06. 9.11.2006.

Seppälä, Joel ja Koponen, Pekka. 2010. Markkinaehtoisen sähkölämmitysohjauksen toimintamallin kehittäminen ja pilotointi etäluettavilla mittareilla. Helen Sähköverkko Oy ja VTT. ENETE hankkeeseen kuuluva luonnos, ei vielä julkaistu.

Tamminen, Eero, 1979. Optimal control problems with discrete time, linear dynamics, and convex state-control constraints. VTT Electrical and Nuclear Technology 26, 1979.

Tamminen, Eero, 1991. An algorithm for discrete optimal control problems with phase control constraints: The linear case. (A new version). VTT/SÄH muistio 3.1.1991. Ei julkaistu.

Tamminen, Eero, 1992 VTT/SÄH muistio 5.8.1992. Ei julkaistu.

Kirjallisuus

Työssä on käytetty hyväksi mm. seuraavaa kirjallisuutta ym. lähteitä:

Bjorndal, Mette, Jörnsten Kurt. 2006. Benefits from coordinating congestion management – The Nordoc power market. Energy Policy 35 (2007).

Altmann, M. et. al. 2010. Decentralized Energy Systems. European Parliament's Committee on Industry, Research and Energy (ITRE). Directorate General for Internal Policies. Policy Department A: Economic and Scientific Policy. IP/A/ITRE/ST/2009-16. June 2010. PE 440.280

Evens, Kärkkäinen, Pihala. 2010 Distributed resources at customers' premises. VTT-R-06411-09

EU-DEEP Results 2004 - 2009 www.eudeep.com

Fingrid 2010, Kantaverkkopalvelut www-sivut

Fingrid ja Energiategellisuus 2010. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. Pdf: ISBN 978-952-5615-30-2.

Fleten, Stein-Erik and Näsäkkälä, Erkka. 2003. Gas fired power plants: Investment timing, operating flexibility and abandonment. Munich Personal RePEc Archive.

HE 218/2002 vp. Hallituksen esitys Eduskunnalle laeiksi sähkömarkkinalain sekä maakaasumarkkinalain 4 luvun 6 §:n muuttamisesta.

Hogan, W. 2007. Acting in Time: Regulating Wholesale Electricity Markets.

Hull, Linda. 2010. Evaluating The Business Case for Micro Demand Response and Energy Saving. INCA-raportti. May 2010 Draft.

Ikäheimo, Evens, Kärkkäinen. 2009. DER Aggregator Business: the Finnish Case. VTT-R-06961-09

Kauppi, Olli ja Liski, Matti. Vesivoimantuotannon tehokkuus pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Helsingin Kaupakorkeakoulu.

Kinttula, Matti. 2008. Pienvesivoiman elvytys, käyttöönotto ja kannattavuus. Diplomityö LTY Sähkötekniikka.

Kivinen, Jyri. 2008. Hajautetun sähköntuotannon verkostovaikutukset. LUT Sähkötekniikan osasto.

Koskiniemi Tomi 13.11.2001 Tuotannon siirtohinnat sähkönjakeluverkossa LTKK Seminaarityö, sähkötekniikan osasto.

Lahdelma, Risto. 2007. Expansion planning of a CHP system using an optimization model. University of Turku. Department of Information Technology. Esitelmä 15.11.2007.

Lehto Ina 2009. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Diplomityö, HTKK Sähkötekniikan laitos.

Lemström, Bettina ja Pirilä, Pekka. Selvitys tuotannon siirtomaksujen määrittelyperusteista. VTT 1998 ENE/15/98.

Näsäkkälä, Erkka. 2005. Electricity derivative markets: Investment valuation, Production planning and hedging. HUT System Analysis Laboratory Research Reports A91, May 2005.

Näsäkkälä, Erkka. 2005. Hydropower production planning and hedging under inflow and forward uncertainty. HUT System Analysis Laboratory Research Reports E15, May 2005.

Paatero, Jukka, Lund, Peter. 2005. A Model for generating household electricity load profiles. *International Journal of Energy Research* 2006:30.

Paatero, Jukka, Lund, Peter. 2005. Effect of Energy Storage on Variations in Wind Power. *Wind Energy*. 2005:8.

Repo, Sami. Hajautetun energiantuotannon verkkoonkytkentä. TTY Sähkövoimatekniikka.

Sorsa, Janne. 2009. Energy efficiency of elevators. Esitelmä 11/27/2009. © KONE Corporation.

Söder Lennart, Amelin, Mikael. A review of different methodologies used for calculation of wind power capacity credit.

Valtionvarainministeriö 2010. Hallituksen esitys Eduskunnalle energiaverotusta koskevan lainsäädännön muuttamisesta.

Valtonen, Petri, Honkapuro, Samuli. 2010. Aggregaattoritoiminnan ja -palveluiden toteuttavuus Suomessa. INCA-raportti. LUT Energia 31.5.2010.