

Kuormituskäyrien hyödyntäminen tulevaisuudessa

Kirjoittajat: Göran Koreneff

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Kuormituskäyrien hyödyntäminen tulevaisuudessa		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Tekes, Mauri Marjaniemi		Asiakkaan viite Tutk.rahoituuspäätös 40247/09
Projektin nimi INteractive Customer gAteway - INCA		Projektin numero/lyhytnimi 41117
Raportin laatija(t) Göran Koreneff		Sivujen/liitesivujen lukumäärä 38
Avainsanat kuormitusmalli, kuormituksen ennustaminen, kulutusestimaatti, kuormitustyyppi, kulutusprofiili		Raportin numero VTT-R-07496-10
Tiivistelmä <p>Työssä tutkittiin varsin laajasti Koillis-Satakunnan Sähkön 52 yksittäisen sähkölämmitystalon mittausten perusteella, kuinka hyvin perinteiset kuormitusmallit (SENER, INDE) vastaavat kuluttajakohtaisia kuormitusmalleja (INCA) tai generistä ennusteohjelmaa (EME Forecast). Yksittäisen kuormituksen estimointi ei ole helppoa. Yleisvaikutelmana INCA ja EME Forecast antoivat toisiaan varsin lähellä olevia tuloksia, tosin INCAssa huomioitiin ulkolämpötilan vaikutuksia selvästi paremmin. Perinteiset kuormitusmallit jäivät pääsääntöisesti selvästi näistä kohdekohtaisesti tehdyistä ennusteista/kuormitusmalleista.</p> <p>Kulutuskohteissa tapahtuu merkittäviä muutoksia lähivuosisikymmeninä. Lämpöpumput sekä lisäävät että vähentävät sähkön käyttöä, sähköautot yleistyvät, hajautettua tuotantoa alkaa löytyä jopa jakeluverkon pienkuluttajilta, joten näille on saatava käyttökelpoiset kuormitusmallit. Kysynnän aktivoituminen oman tuotannon, hintaohjauksen ja lisääntyvän ohjautautomaation ja ohjattavien kuormien myötä ja ehkä energiavarastojen avustamana (mm. vesivaraajat) tekee sen, että indeksipohjaisten kuormituskäyrien rinnalle tarvitaan dynaamisiin käyriin pystyviä kuormitusalgoritmeja. Perinteisten kuormitusmallien lukumäärä, sisältö ja käyttö eivät enää vastaa alati muuttuvan tulevaisuuden huutoon.</p> <p>Raportissa hahmotellaan osakuormitusrakennuspalikoiden käyttöönottoa kuormitusmallinnuksessa. Rakennuspalikoilla voitaisiin ynnätä tai vähentää osakuormia perusmallin kuormituskäyristä. Esim. omakotitalon sähkön kulutus voitaisiin koota kotitaloussähköstä, sähköauton latauksesta, suorasta sähkölämmityksestä ja negatiivisena kuormana lämpöpumpun säästövaikutuksesta suoraan sähkölämmitykseen.</p>		
Luottamuksellisuus	Julkinen	
Espoo 15.9.2010 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
Göran Koreneff, tutkija	Pekka Koponen, projektipäällikkö	Seppo Hänninen, teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot		
Jakelu Julkinen, Inca:n www-sivut		
<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

Raportti on syntynyt INCA-tutkimushankkeessa 2009-2010. Tässä suoritettu ja raportoitu INCA-hankkeen osatutkimus on keskittynyt arvioimaan kuormitusmallien tulevaisuutta muuttuvien ympäristötekijöiden, kuten tuntimittauksen, energiavarastojen, jakeluverkkoon liitetyn hajautetun tuotannon, kuormituksen ohjauksen, sähköautojen ja lämpöpumppujen, yleistyessä tulevina vuosina.

VTT:n osatutkimus on suoritettu läheisessä yhteistyössä Tampereen teknillisen yliopiston (TUT) kanssa. Antti Mutanen TUT:sta on vastannut tutkimusaineistosta eli Koillis-Satakunnan Sähkön AMR-mittausaineistosta ja kuormitusmalleihin liittyvistä laskennoista sekä tulokoosteista. Antti Mutanen raportoi erikseen omasta kuormitusmallitutkimuksestaan.

Tekijä haluaa kiittää antoisista keskusteluista myös muita tästä osaprojektista kiinnostuneita, joista mainittakoon Maija Ruska ja Pekka Koponen VTT:ltä ja Pekka Verho ja Pertti Järventausta TUT:sta.

Espoo 15.9.2010

Tekijä

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1 Johdanto.....	5
2 Tavoite.....	6
3 Muutokset tuulet	6
3.1 Hajautettu tuotanto.....	7
3.2 Uudet sähkökäytöt	8
3.2.1 Lämpöpumput ja lattialämmitys.....	8
3.2.2 Sähköautot.....	8
3.2.3 Muut kulutusmuutokset	9
3.3 Ohjattavat ja/tai joustavat kuormat.....	9
4 Käytetyt kuormitusmallit ja ennusteohjelma.....	10
4.1 Kuormitusmallit yleensä	10
4.1.1 INCA 1-kuormitusmallit	11
4.1.2 INCA 2-kuormitusmallit	12
4.1.3 SENER-kuormitusmallit.....	12
4.1.4 INDE-kuormitusmallit	12
4.2 EME Forecast ennustemalli	13
4.2.1 EME Forecastin yleiskuvaus.....	13
4.2.2 EME Forecast -ennusteet	14
5 Yksittäisen kulutuskohteen estimointi	15
5.1 Valitut kohteet.....	15
5.2 Kohteiden ja EME Forecast -ennusteiden tarkastelu esimerkein.....	16
5.2.1 INCA 43 -Omakotitalo, käyrä 1 (Sener 110).....	16
5.2.2 INCA 14 -Omakotitalo, käyrä 4 (Sener 510).....	18
5.2.3 INCA 20 - käyrä 3 (Sener 300).....	19
5.2.4 INCA 61 - Omakotitalo, käyrä 1 (Sener 110).....	20
5.2.5 Johtopäätöksiä esimerkeistä.....	20
5.3 Kulutuskohtekohtaisten estimaattien virheet.....	22
5.3.1 Ennustemallit INCA ja EME Forecast	22
5.3.2 Bonustarkastelut	23
5.4 SENER ja INDE-kuormitusmallien estimaatit.....	25
6 Kohteiden summakulutusten ja kulutussummien estimaatit.....	26
6.1 Summakulutuksen EME Forecast -estimaatit	26
6.2 Summakäyrien ja käyräsummien ennustevirheet.....	29
6.3 Maakohtainen kulutus kuormitusmalleilla.....	30
7 Johtopäätökset	32
7.1 Muutokset toimintakentässä.....	32

7.2	Kuormitusmalleja koskevien hypoteesien tarkistaminen	33
7.2.1	Hypoteesi 1	33
7.2.2	Hypoteesi 2	33
7.2.3	Hypoteesi 3	34
7.3	Kuormituskäyrien lukumäärä	34
7.4	Jatkotutkimus- ja kehityskohteita	35
7.4.1	Uudet kuormitustyytit	35
7.4.2	Kuormitustyytin automaattinen luokittelu	36
7.4.3	Dynaamiset kuormitustyytit	36
7.4.4	Rakennuspalikat ja rakennuspalikkamalli	36
8	Yhteenveto	37
	Lähdeviitteet	38

1 Johdanto

Kuormituskäyrien perinteinen käyttöpaikka on ollut verkkoyhtiöissä. Niillä estimoidaan verkon tilaa ja niitä käytetään verkon suunnittelussa. Suomi on ollut tutkimuksessa edelläkävijöitä johtuen muun muassa sähköyhtiöiden yhteistyötä edistävästä toiminnasta Suomen Sähkölaitosyhdistyksessä (nykyisin SENER). Kuormituskäyriä julkaistiin viimeksi 1990-luvun alkupuolella (SLY 1992). Anssi Seppälältä valmistui aiheesta väitöskirja (Seppälä 1996).

Kuormituskäyrätutkimus siirtyi VTT:lle, mutta pienimuotoisempana. 2003 valmistui uusia ja/tai muokattuja kuormituskäyriä Maija Ruskan ja Mikko Jalosen toimesta. Uudet käyrät ovat käytössä vain osalla verkkoyhtiöistä.

Toimintaympäristössä tapahtuvat muutokset muuttavat myös kuormituskäyrien käyttötarvetta ja hyödynnettävyyttä. Älykäs verkko parantaa mittaustietoa ja tiedon saatavuutta AMR:n (automatic meter reading) leviämisen seurauksena samalla kun käyttäjäpää muuttuu dynaamisemmaksi. Uudet kuormatyyppit kuten sähköautot ja lämpöpumput valtaavat alaa, samoin hajautettu tuotanto, ja kulutus pää aktivoituu nykyistä useammin ja helpommin hinnan- tai kuormanohjauksen perusteella.

Sähkömarkkinoiden avautuminen 1996 aiheutti selvän muutoksen sähköyhtiöiden toimintatavassa, mm. verkkotoiminnan ja sähkön tuotannon ja myynnin eriyttämisen. Vastuiden ja hyötyjen rajaveto eri osapuolten välillä hämärtyi. Roolit ja vastuunjaot ovat selkeytyneissä kiitos mm. EU:n lainsäädännön, jossa energiapalvelutuottajia ja aggregaattoreita peräänkuulutetaan. Käyttökelpoiset kuormitusmallit hyödyntäisivät verkon älyllistymistä ja erityisesti kuormien, energiavarastojen ja hajautetun tuotannon ohjausta. Ei ole ihme, että kuormitusmallinnukseen on herännyt uutta kiinnostusta viime vuosina.

SEKKI-projektissa tutkittiin VTT:llä kulutusmuutosten (sähköautot, lämpöpumput) vaikutuksia Suomen kokonaiskulutukseen ja tuntikäyrään case-tarkastelujen pohjalta (Koreneff 2009). Silloin jo kehittyi näkemys, että nykyinen kuormituskäyrien käytötapa ei välttämättä tule toimimaan tulevaisuudessa sellaisenaan.

2 Tavoite

Kuormitusmallien käyttö kohtaa sekä myötä- että vastatuulia tulevissa muutospuhureissa. Tutkimuksen tavoitteena on hahmottaa tärkeimpiä muutostekijöitä ja niiden vaikutuksia kuormitusmalleihin ja niiden käyttöön tulevaisuudessa. Lähtökohtana on seuraavat omaan harkintaan pohjautuvat hypoteesit, joille haetaan vahvistus tai hylkäys:

- Hypoteesi 1: SENERin 1990-luvun kuormitusmallit eivät kuvaa tämän päivän eikä tulevaisuuden kuormituskohteita Suomessa.
- Hypoteesi 2: Kuormitusmallien luokittelu 46 tyyppiin ei ole riittävä.
- Hypoteesi 3: Kuormitusmallien nykyinen käyttöperiaate ei toimi tulevaisuuden Suomessa.

Kuormitusmallien lyhyen aikavälin käyttö, esimerkiksi verkon tilan estimointiin tai lähipäivien kulutuksen ja sen muodon arviointiin, muuttuu lisääntyvien mittauksen myötä. Kuinka hyvin yksittäisten kohteiden tuntikulutuskäyriä voidaan edes ennustaa? Tätä tutkitaan sekä yleisten (SENER) että verkkoyhtiön käytössä olevien (INDE paremman nimen puuttuessa) kuormitusmallien avulla ja tuloksia verrataan yksittäiskohteiden kuormitus-/ennustemallien (INCA, EME Forecast) vastaaviin. Yksittäisten kohteiden kulutusestimaateista on hyötyä kysynnän ja/tai hajautetun tuotannon ohjauksessa ja uusien osakuormien arvioinnissa ja hallinnassa.

Verkon kannalta kiinnostus kuitenkin yleensä kohdistuu joukkoon yksittäisiä kohteita, jossa kokonaisuus on osia tärkeämpi. Tutkimuksen tavoitteena on hahmottaa mitä kaikkea ennustamisessa muuttuu liitettäessä kohteita yhteen.

Verkkosuunnittelussa tai pitkän aikavälin kysyntäennusteissa kohdataan omia ongelmia. Kuinka hyvin nykyiset kuormitusmallit vastaavat tulevaisuuden kulutuskohteita, entä millaisista kuormituskäyrätyypeistä olisi eniten hyötyä? Tavoitteena on saada hahmotetuksi kuormitusmallien ympärille sellainen kokonaisuus, joka vastaa tulevaisuuden huutoon.

Tässä raportissa arvioidaan kuormituskäyrien kannalta tärkeitä sähköjärjestelmässä tapahtuvia muutoksia luvussa 3, esitellään käytettyjä malleja luvussa 4, tutkitaan kuormituskäyrien käyttöä yksittäiskohteiden ennustamiseen luvussa 5 ja eri kohteiden summakulutuksen estimointia luvussa 6.

Kuormituskäyrien käyttöä koskevista tulevaisuuden näkymistä vedetään johtopäätökset luvussa 7. Luvussa 8 hahmotellaan kuormituskäyrille uutta lähestymis- ja käyttötapaa eli palikka-ajattelua ja luvussa 9 esitetään yhteenveto.

3 Muutokset tuulet

Sähköjärjestelmä ja kulutuskäyttäytyminen on astumassa murrosvaiheeseen. Älykäs sähköverkko eli populaarisemmin Smart Grid (SG) on ollut hyvin esillä viime aikoina, kuten hajautettu tuotanto sekä uusiutuvaan energiaan pohjautuva sähkön tuotanto. Osin kyse on hyvin yhteen kytketyistä ilmiöistä. Huoli maailman tulevaisuudesta hiilidioksidipäästöjen ikeessä on saanut EU:ta tarttumaan toimeen

uusiutuvan energian tuotannon ja käytön lisäämiseksi, mikä on lisännyt hajautettua tuotantoa. Varsinkin tuulivoima on tuotannoltaan hallitsematonta ja hyvin oikukasta, joten säätövoiman tarve kasvaa. Uusi kapasiteetti on kallista, joten kysynnän jouston, kuorman ohjauksen ja energiavarastojen avulla välttyään mittavilta säätövoimainvestoinneilta. SG:n on tarkoitus antaa älykkäille loppukuluttajille, mukaan lukien hajautettu tuotanto, puitteet. Jakeluverkossa sähkö ei enää kulje ainoastaan korkeammilta jännitetasoilta alas ja loppukuluttajille, vaan sähköä siirtyy jo nyt ajoittain ja paikoitellen loppukuluttajalta jakeluverkkoon. Paikallisen hajautetun tuotannon lisääntyessä sähkö voi ajoittain kiivetä jännitetasoa ylöspäin korkeammille jännitetasoille. Kaksisuuntaisen jakeluverkon hallinta vaatii paitsi älykästä automaatiota myös hyvät tiedot kulutuksista.

EU:n toinen suuri tavoite vuodelle 2020 on energiatehokkuuden parantaminen 20 %. Tätä tavoitetta edistävät paitsi yhteistuotanto myös lämpöpumput ja sähköautot. Nämä eivät ole uusia kulutuskohteita, vaan olemassa olevien kulutuskohteiden mittauspisteiden takana tapahtuvia merkittäviä muutoksia. Sähköauton vuosikulutus on noin 3-4 MWh ja vuorokausikohtainen lataus keskittyy vain muutamille tunteille. Lämpöpumppu lisää tai vähentää sähkön kulutusta, muusta lämmityslähteiden kokoonpanosta riippuen, ja sähkön kulutuksen muutos riippuu voimakkaasti säästä.

3.1 Hajautettu tuotanto

Uusiutuva energia, pois lukien suurvesivoima, on luonnostaan harvaan esiintyvää ei-tiheää energiaa joka parhaiten sopii lähikäyttöön. Pienimuotoinen hajautettu sähkön tuotanto tulee yleistymään tuulivoiman, aurinkokennojen, biokaasun ja muun biomassan CHP-käytön myötä. Keski-Euroopassa löytyy jo paikoitellen talokohtaisia mikroturbiineja, ei vain maakaasujakeluverkon yhteydessä vaan myös esimerkiksi biopolttoaineilla toimivia. Pienimuotoinen hajautettu sähkön tuotanto on jo Euroopassa kovassa kasvussa., varsinkin Saksassa, jossa on aurinkokennoja tuhansien megawattien edestä, kymmeniä tuhansia tuulivoimaloita, yllin kyllin biokaasua tai puuta tai biomassaa käyttäviä pieniä voimaloita, aurinkolämpövoimaloita jne.

Hajautetulla tuotannolla on kaksi eri vaikutusta kuormituskäyrien käyttöön. Kuten edellä jo todettiin, kun tuulivoimaa saadaan järjestelmään paljon, tarvitaan myös paljon uutta säätövoimaa, ellei itse järjestelmää saada joustavammaksi. Tästä syystä SG:iin kohdistetaan suuria odotuksia, sillä se lisää järjestelmän joustavuutta. Joustavuuden ohjaus hyötyy hyvistä ja toimivista kuormituskäyristä, koska niiden avulla pystytään paremmin määrittämään mahdolliset ohjaukset ja myöhemmin todentamaan ohjausvasteet.

Hajautetun tuotannon toinen vaikutus on tarve uusiin käyriin, tuotantokäyriin. Jakeluverkkoa voi olla vaikeata mallintaa ellei siihen saada mukaan kaikenlaiset hajautetut tuotannot. Pienjänniteverkon tasolla kyse voi olla aurinkokennoista, pienistä tuulivoimaloista, mikroturbiineista ja muusta CHP:sta jne. Kuormitusmallien muodostaminen ei kaikissa tapauksissa edellytä mittaustietoja, koska fysikaaliseen malliin/simulointimalliin perustuvat käyrät voivat toimia jopa paremmin. Esimerkiksi tuulivoiman tuotantokäyrä saa olla hyvin voimakkaasti vaihteleva kun tutkitaan verkon kapasiteetin riittävyttä ja huipputehoa. Toisaalta

ennustevirhekin voi silloin olla hyvin suuri. Jos tarvitaan pitää ennustevirhettä kurissa, kannattaa käyttää keskituotantoa.

3.2 Uudet sähkökäytöt

3.2.1 Lämpöpumput ja lattialämmitys

Lämpöpumput löivät itsensä läpi Ruotsissa 1980-luvulla samalla kun kasvu Suomessa tyrehtyi. Ruotsin hallituksen tuki öljy- (ja sähkö)lämmityksestä pois siirtyville aiheutti Ruotsissa 1990-luvulta lähtien selvän lisäyksen lämpöpumppuinstallaatioissa ja Ruotsi onkin lämpöpumppujen johtava maa. Suomessa trendi on ollut viime vuodet voimakkaasti nouseva.

Lämmitysratkaisut monipuolistuvat. Vanha suora sähkölämmitys saa ehkä rinnalleen ilma-ilmalämpöpumpun. Uusissa taloissa voi olla ilma-vesi-lämpöpumppu, poistoilmalämpöpumppu, maalämpöpumppu tai ilma-ilmalämpöpumppu. Sähköinen kosteiden tilojen lattialämmitys on yleistä myös uusissa kaukolämmityksissä. taloissa yms.

Ilmalämpöpumppu näkyy sähkölämmitystalossa sähkön kulutuksen vähentymisenä. Oletetaan, että 20 MWh talossa uusi ilmalämpöpumppu pudottaa kulutuksen 13 MWh:iin. Mikäli, tai paremmin koska asiakas ei ilmoita lämpöpumpusta verkkoyhtiölle ja/tai sähköyhtiölle, käytetään samaa sähkölämmityskuormituskäyrää mutta enää 2/3 vuosienergialla. Koska ilmalämpöpumppujen toimintakyky ja hyöty häviää noin -25 °C kohdalla, olisi uusi huipputehoennuste 50 % liian alhainen, olettaen sen aikaisemmin osuneen nappiin. Kesäaikainen kulutusennuste on enää 2/3 vanhasta, mutta kulutus ei muutu tai voi jopa kasvaa, joten kesällä systemaattinen mallinnusvirhe on 30 %.

3.2.2 Sähköautot

Sähköautot ovat vasta tulossa. Suurin hidaste on ollut huonokapasiteettiset ja kalliit akut. Akkuteknologia tosin kehittyy koko ajan ja uudet litium-ioni-akut tarjoavat jo painoonsa nähden kohtalaista kapasiteettia ja käytettävyyttä. Autojen hinta on edelleen ongelma, mutta kun ”polttoainekustannukset” ovat pari euroa sadalla kilometrillä kaupunkiajoa ja paikallispäästöt nollassa, voidaan tulevaisuudessa odottaa ihan merkittävää penetraatiota.

Autojen sähköistyminen yleistyy Suomessa ja maailmalla 2020-lukua kohti mentäessä. Arviot sähköautojen penetraatiosta vaihtelevat, mutta lienee noin 5% vuonna 2020 ja 20-50 % vuonna 2030. Sähköautojakin on erityyppisiä, on esimerkiksi täyssähköautoja ja plugin-hybridejä. Täyssähköauto (full electric vehicle, FEV, battery electric vehicle, BEV) toimii pelkästään sähköllä. Sen takia siinä on suurempi akku ja suurempi sähkön lataustarve kuin plugin-hybridillä (plug-in hybrid electric vehicle, PHEV), jonka akun kantosäde lienee noin 20-50 km näin alkuvaiheessa. Suurin osa työmatkoista ja päivittäisajeluista mahtuu melko hyvin akun kantosäteeseen, varsinkin jos työpaikalta löytyy myös latauspiste. Sähkön loppuessa matka jatkuu hybridissä polttoaineen voimin. Onkin todennäköistä, että plugin-hybridit ovat alkuvaiheessa täyssähköautoja suosittumia (Koreneff 2009).

Sähköautojen karvahattulataus (töpseli seinään ja sähköä purkkiin) kestää noin kolme neljä tuntia ja muodostaa aikamoisen piikin (16A sulakkeella noin 3,5 kW) minkä tahansa omakotitalon kulutukseen. Sitä on mahdotonta mallintaa olemassa olevilla SENERin käyrillä. Vuosienergiamuutoksen lisäys vaihtamatta mallia heikentää entisestään mallin käytettävyyttä. Mallit olisi luotava uusiksi siten, että kullekin omakotikulutustyyppille saataisiin rinnalle sähköautollinen vastaava tyyppi. Mikäli kyseeseen voisi tulla myös älykäs lataus, tarvitaan vähintään kolmas rinnakkainen omakotisarja.

3.2.3 Muut kulutusmuutokset

Energiakäytön tehostuminen on merkittävä muutostekijä. Valaistus on jo noussut eniten sähköä kuluttaviksi laitteiksi kotitalouksissa (ADATO 2008), mutta siirtyminen hehkulampuista energiasäästölamppujen kautta LEDeihin tulee taas muokkaamaan kotitaloussähkön tuntikäyrää. Energiatehokkuuden parantaminen johtanee osin sähkön käytön lisääntymiseen toimintojen ja prosessien sähköistymisen myötä. Voidaan olettaa, että kuormitusprofiileja on muutettava ja kehitettävä. Tässä AMR:llä on merkittävä panos annettavanaan.

Kuluttajakohtaisten tuntimittausten avulla saadaan valtavasti mittaussaineistoa verkkoyhtiöittäin kuormitusmallinnuksen käyttöön. Enää ei välttämättä tarvitse tyytyä 46 valmiiseen profiiliin. Profiileja voidaan laskea itse, luokitusta jopa muuttaa ja miksei käsiteltäisi kaikkia erikoisia kuluttajatyyppejä erikseen.

Maaseudun verkkoyhtiöissä kesämökkien sähköistys näkyy ja tuntuu. Parhaimmissa kesämökkikunnissa on enemmän kesämökkeilijöitä kuin vakituksia asukkaita. Kesämökkien mallintamiseen voi olla syytä käyttää useita kuormitusmalleja.

3.3 Ohjattavat ja/tai joustavat kuormat

Nykyisin harvalla pienkuluttajalla on pörssihintaan tai muuhun dynaamisesti vaihtuvaan ohjaushintaan suoraan kytketty sähkömaksu, mutta tulevaisuudessa tämä osuus tulee kasvamaan. Tuntimittaus ja laskutus todellisen tuntimitatun kulutuksen perusteella ovat Suomessa tulossa lähes kaikille ohjausten kannalta relevanteille sähkön käyttäjille ja tuntihintoihin perustuvia tariffeja on jo saatavissa. On odotettavissa että muita esteitä raivataan, varsinkin kun kuorman jouston tarve on myös kasvamassa. Tarvitaan siis ohjausmalli, joka arvioi kulutuksen muutosta.

Miten sähköautot ladataan? Alkuvaiheessa ladattaneen heti kytkettäessä auto pistokerasiaan, mutta älykäs lataus lienee pääasiallinen latausmuoto jo 2020 mennessä. Älykkään latauksen takana voi yksinkertaisimmillaan olla aikaohjaus, mikä helpottaisi mallinnusta, mutta hintaohjauksessa hyödynnettäisiin parhaiten Smart Gridiä ja kulutuksen ohjausta. Hintaohjaus, esimerkiksi spot- ja tasesäätöhintojen avulla, vaatii jo kuormitusmallinnukselta uudistumista.

Kun sähkölämmittäjät tulevat tuntimittauksen ja todelliseen tunneittaiseen kulutukseen perustuvan laskutuksen piiriin ja samalla joustojen tarve sähkömarkkinoilla kasvaa, on odotettavissa nykyistä dynaamisempien ohjausten yleistymisen. Esimerkiksi varaavaa sähkölämmitystä siirtynee aikaohjauksista siihen, että ohjaukset tapahtuvat dynaamisesti sähkömarkkinoiden nopeiden

hintavaihteluiden perusteella. Tulevaisuudessa saattaa tulla välttämättömäksi saada lämpöpumput kysyntäjouston piiriin.

Yhdellä kuormitusmallilla on aikaisemminkin ollut hankalaa mallintaa hyvin erilaisia kaksiaikatariffeja ja varaavia sähkölämmityksiä. Päivätariffin vaihtuminen yötariffiksi on eri verkkoyhtiöissä vaihdellut. Jotkut varaavat sähkölämmitykset osaavat jo pilkkoa lämpövaraamisen tasaisemmin yön eri tunneille sen sijaan, että teho olisi tapissa alusta asti siihen, että varaaja on täynnä.

4 Käytetyt kuormitusmallit ja ennusteohjelma

4.1 Kuormitusmallit yleensä

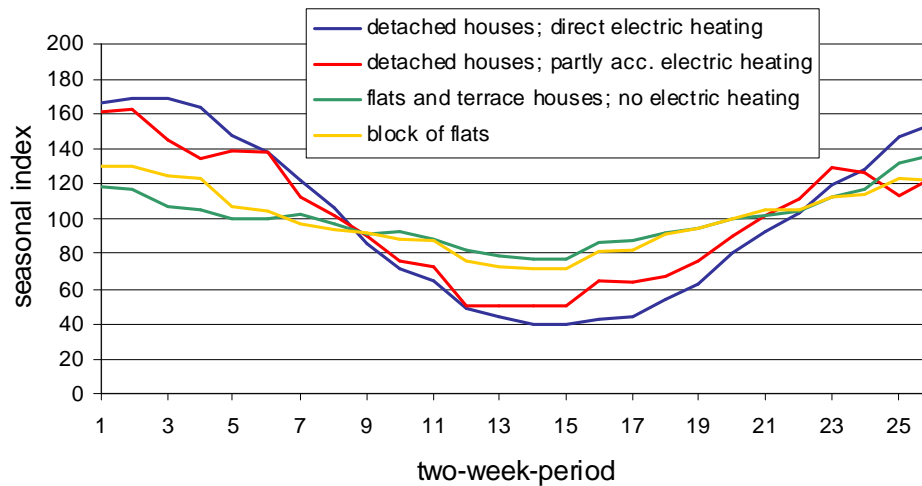
Kuormitusmallilla tarkoitetaan tietyn tyyppisen kuluttajan keskimääräistä kulutusjakaumaa vuoden ja viikon sisällä. Yleisin tapa kuvata kuormituksen vaihtelua on indeksien avulla.

- Perinteisessä indeksimallissa on 26 ulkoindeksiä (kukin vastaa kahta viikkoa) kuvaamassa vuosivaihtelua ja kullekin kaksiviikkoisjaksolle $3 \cdot 24$ sisäindeksiä kuvaamassa sisäistä tehojakaumaa. Kuvassa (Kuva 1) esitetään ulkoiset indeksisarjat neljälle asumistyyppille ja kuvassa (Kuva 2).
- Uudemmissa indeksimalleissa käytetään toisinaan kuukausia kaksiviikkoisjaksojen tilalla eli malli on muotoa $12 \cdot (3 \cdot 24)$ indeksiä. Kullekin kuukaudelle on arki-, aatto- ja pyhäindeksit vuorokauden kaikille tunneille.
- SENERin kuormitusmallikirjastossa on 46 (SLY 1992) eri kuormitustyyppiä, kerrostaloasunnosta osittain varaavan sähkölämmityksen kautta kolmivuoroteollisuuteen.

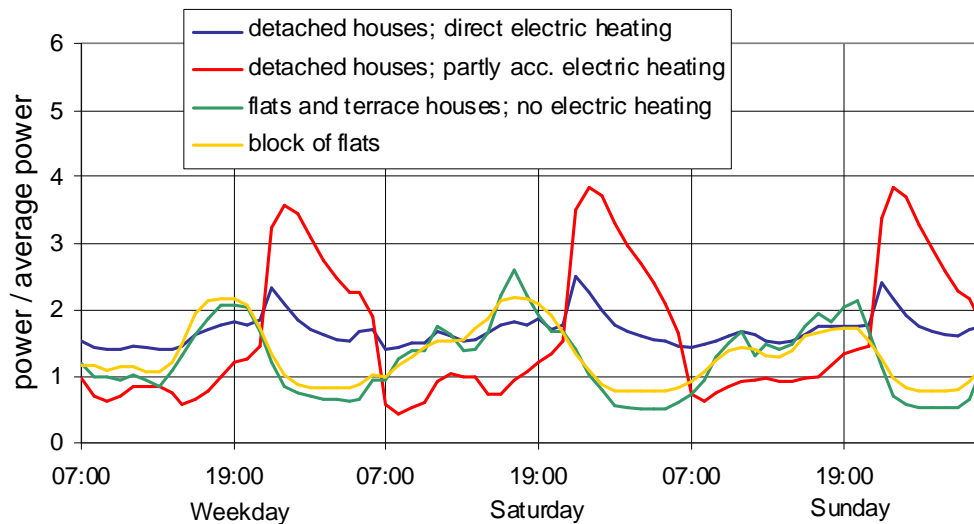
Tarkastelussa käytetyt INCA-mallit ovat TUT:n tässä projektissa kehittämiä kuormitusmallinnuksia. Niiden avulla on muodostettu kulutuskohdekohtaisia kuormitustyyppiä eli käytännössä ennustemalleja.

Koillis-Satakunnan Sähkön käytössä olevat kuormitusmallit (tässä käytetään niille nimitystä INDE) poikkeavat SENERin malleista. Tutkimuksessa tarkastellaan myös INDE-malleja.

Jäljempänä olevat INCA-, SENER- ja INDE-mallien kuvaukset (4.1.1 - 4.1.4) ovat Antti Mutasen toimittamia.



Kuva 1. Ulkoiset indeksisarjat eli vuodenaikavaihtelut 2-viikkoisjaksoissa neljälle eri asumisen kuormitusluokalle: suora sähkölämmitys, osittain varaava sähkölämmitys, rivi- ja kerrostaloasunto sekä kerrostaloyhtiö. (Koreneff 2009)



Kuva 2. Sisäiset indeksit ensimmäiseltä 2-viikkoisjaksolta neljälle eri asumisen kuormitusluokalle: suora sähkölämmitys, osittain varaava sähkölämmitys, rivi- ja kerrostaloasunto sekä kerrostaloyhtiö. (Koreneff 2009)

4.1.1 INCA 1-kuormitusmallit

INCA kuormitusmalli 1 a)

- Kuormitusmalli on laskettu vuoden 2006 mittauksista siten, että jokaiselle 12 kuukaudelle on laskettu 3 tyyppipäivää (arki-, lauantai ja pyhäpäivät).
- Kuormitusmallin muodostus:
 1. Lasketaan lämpötilariippuvuuskerroimet ($\%/^{\circ}\text{C}$) kaikille 4 vuodenaikalle.
 2. Normalisoidaan mittaukset keskimääräiseen lämpötilaan.

3. Lasketaan tyyppipäivät (keskiarvot kunkin kuukauden samantyyppisistä päivistä).
4. Muodostetaan tyyppipäivistä vuoden 2007 ennuste.

INCA kuormitusmalli 1 b)

- kuten kuormitusmalli 1 a) mutta vuoden 2007 päivän d kuormitusennustetta laskettaessa on huomioitu myös edellisen vuorokauden (d-1) keskilämpötila.
- Kuormitusmallin muodostus
 - 1-4. Kuten kuormitusmallissa 1 a)
 5. Korjataan kuormitusennustetta edellisen vuorokauden keskilämpötilan mukaan.

4.1.2 INCA 2-kuormitusmallit

INCA kuormitusmalli 2 a)

- Kuormitusmalli on laskettu vuoden 2006 mittauksista siten, että jokaiselle 12 kuukaudelle on laskettu 7 tyyppipäivää (ma, ti, ke, to, pe, la, su). Lisäksi erikoispäiville (Vappu, Juhannus, Joulukuu yms.) on tehty omat mallit.
- Kuormitusmallin muodostus:
 - 1-4. Kuten kuormitusmallissa 1 a)

INCA kuormitusmalli 2 b)

- kuten kuormitusmalli 2 a) mutta vuoden 2007 päivän d kuormitusennustetta laskettaessa on huomioitu myös edellisen vuorokauden (d-1) keskilämpötila.
- Kuormitusmallin muodostus:
 - 1-5. Kuten kuormitusmallissa 1 b)

4.1.3 SENER-kuormitusmallit

SENER kuormitusmallit

- Senerin toimittamat käyttäjäryhmäkohtaiset kuormitusmallit (46 käyttäjäryhmää)
 - a) Ei huomioitu lämpötilariippuvuuskertoimia ennusteessa (näille kuormitusmalleille on saatavissa ainoastaan tammikuun lämpötilariippuvuuskertoimet).
 - b) Käytetty virheellisesti tammikuun lämpötilariippuvuuskertoimia koko vuodelle.

4.1.4 INDE-kuormitusmallit

INDE kuormitusmallit

- Koillis-Satakunnan verkkotietojärjestelmässä nykyisin käytössä olevat käyttäjäryhmäkohtaiset kuormitusmallit
 - a) Ei huomioitu lämpötilariippuvuutta ennusteessa (näille kuormitusmalleille ei ole saatavilla lämpötilariippuvuuskertoimia).
 - b) Käytetty -4 %/°C lämpötilariippuvuuskerrointa kaikille sähkölämmitysasiakkaille (yleinen oletus sähköverkkoyhtiöissä).

4.2 EME Forecast ennustemalli

4.2.1 EME Forecastin yleiskuvaus

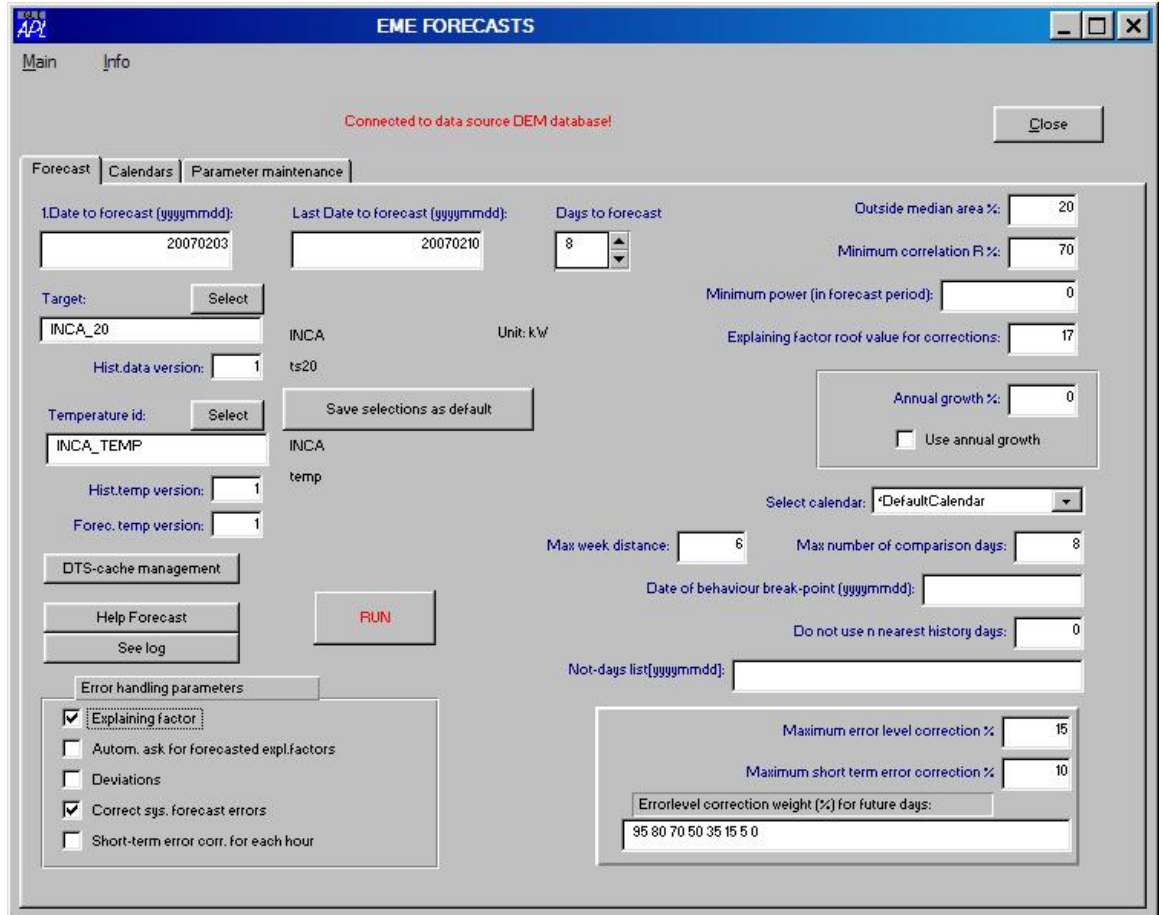
Sähkönkulutuksen tuntiennustemallia kehitettiin VTT:llä jo Edison-tutkimusohjelmassa 1990-luvun keskivaiheilla ja Tesla-tutkimusohjelmassa 1998-2002 saatiin valmiiksi yleiskäyttöinen ennusteohjelma EME Forecast, jota voidaan käyttää kaukolämmön tai sähkön kulutuksen tuntiennusteisiin ja jopa sähkön pörssihinnan estimointiin. EME Forecastin etuja on, ettei käyttöönotto vaadi mitään muuta tietoa tai lähtöanalyysia ennustekohteesta kuin jonkinlaiset mitatut tuntiaikasarjat, vaikkakin reiälliset, läheiset/kaukaiset tai hyvin lyhyet.

Mallissa estimoidaan kulutusta käyttäen vastaavien historiassa olevien päivien toteutumia apuna. Vastaavien vertailupäivien valinnassa otetaan huomioon kalenteriläheisyys ja viikonpäivä huomioiden juhlapyhät. Ulkolämpötilan vaikutusta kulutukseen arvioidaan automaattisesti kunkin ennustepäivän osalta korrelaatioanalyysin avulla.

EME Forecastin ennustemenetelmä on heuristinen ja edellä esitetyn Inca 2-kuormitusmallin tyylinen. Saman viikonpäivän vertailupäiviä eli mallinnuspäiviä haetaan ensisijaisesti läheltä ja, jos ei löydy, edellisvuodelta ja edelleen, jos ei löydy, muista viikonpäivistä jne. Erikoispyhiä ei hyväksytä normaalien ennustepäivien vertailupäiviksi.

Selittäjän (yleensä ulkolämpötilan) otetaan erillisen dynaamisen eli aina ennustettaessa tehtävän regressioanalyysin kautta huomioon. Liian huonon korrelaation omaavia selittäjiä ei hyväksytä malliin. Regressio tehdään erikseen päivä- ja yö- tunteille.

EME Forecast on parametroitu, kts. (Kuva 3), joten käyttö pystyy säätämään ennusteen ajoa ennustekohdekohtaisesti niin halutessaan, muuten käytetään oletusparametreja (niitä voi myös säätää).



EME FORECASTS

Main Info

Connected to data source DEM database! Close

Forecast Calendars Parameter maintenance

1 Date to forecast (yyyyymmdd): 20070203 Last Date to forecast (yyyyymmdd): 20070210 Days to forecast: 8 Outside median area %: 20

Target: INCA_20 INCA Unit: kW Minimum correlation R %: 70

Hist.data version: 1 ts20 Minimum power (in forecast period): 0

Temperature id: INCA_TEMP INCA Explaining factor roof value for corrections: 17

Hist.temp version: 1 temp Annual growth %: 0

Forec.temp version: 1 temp Use annual growth:

Save selections as default

Select calendar: *DefaultCalendar

DTS-cache management Max week distance: 6 Max number of comparison days: 8

Help Forecast RUN Date of behaviour break-point (yyyyymmdd):

See log Do not use n nearest history days: 0

Error handling parameters

Explaining factor

Autom. ask for forecasted expl.factors

Deviations

Correct sys. forecast errors

Short-term error corr. for each hour

Maximum error level correction %: 15

Maximum short term error correction %: 10

Errorlevel correction weight (%) for future days:
95 80 70 50 35 15 5 0

Kuva 3. EME Forecastin käyttämät ennusteparametrit. Käyttäjä voi esimerkiksi luoda ennustekohteelle oman kalenterin mm. räätälöidyillä erikoispyhien käsittelysäännöillä.

4.2.2 EME Forecast -ennusteet

Ennusteet tehtiin täysin sokkona tietämättä kulutuksesta yhtään mitään. Kaikki ajot tehtiin oletusparametriarvoilla (paitsi d2 jäljempänä). EME Forecastilla laskettiin neljä erilaista ennustetta:

- käytetään vain vuoden 2006 mittauksia ennustettaessa. Ulkolämpötilaa ei huomioida.
- kuten a ja lisäksi koetetaan ottaa ulkolämpötila huomioon automaattiregressio-osiolla. Ennustepäivän ulkolämpötilaa käytetään ko. päivän ennusteulkolämpötilana.
- käytetään kaikkia historia-arvoja hyväksi ennustettaessa eli mukaan lukien ennustettavaa päivää edeltävän päivän toteumat. Tässä hyödynnetään myös ennustevirhetasokorjausta, jossa katsotaan edellisen samantyyppisen päivän toteutunutta ennustevirhettä ja koetetaan ottaa tämä huomioon uudessa ennusteessa. Ei ulkolämpötilan huomiointiyritystä.
- kuten c ja lisäksi koetetaan ottaa ulkolämpötila huomioon automaattiregressio-osiolla. Ennustepäivän ulkolämpötilaa käytetään ko. päivän ennusteulkolämpötilana.

Tulostarkastelun jälkeen tehtiin vielä yksi ajo, jossa parametreja muutettiin. Tärkeimmät muutokset:

- § Lisättiin ulkolämpötila-analyysin robustisuutta. Oletusarvona ulkolämpötilan regressiokertoimen käytölle on perusasetuksissa vähintään 70 % korrelaatiota, mutta nyt se laskettiin 35 %. Mitä pienempi prosenttiluku, sitä herkemmin saadaan korjauskerroin ulkolämpötilalle, mutta toisaalta sitä useammin korjaus heikentää ennustetta.
- § Ennustevirhetasokorjausalgoritmille annettiin enemmän potkua. Vaikutusta oli rajattu 15 %:iin tehosta, mutta nostettiin nyt 35 %:iin. Ennustetason virhe on yleensä systemaattinen virhe, jota esiintyy erityisesti muutosajakaan kuten keväällä ja syksyllä. Tutkimalla edellisen päivän ennustevirheen tasoa ja säännöllisyyttä voidaan korjausalgoritmillä parantaa ennusteen hyvyttä keskimäärin. Joskus vaikutus voi olla päinvastainen. Koska ennusteen tasokorjaus voi joskus olla selvästi pielessä erinäisistä satunnaisista syistä johtuen, rajoitetaan korjauksen läpilyöntiä. Yksittäiskuluttajalla vaihtelut ovat luonnostaan hyvin suuria, joten korjaukselle on sallittava yleistä suuremmat korjausarvot.

Lisäajo:

- d2) kuten d, mutta ennusteparametreja muutettu. Yksittäinen kulutuskohte on selkeästi stokastisempi kuin mitä oletusparametriasetuksilla on ajateltu, joten käytettiin edellä esitetyn mukaisesti muokattuja arvoja.

5 Yksittäisen kulutuskohteen estimointi

5.1 Valitut kohteet

Incassa tehtiin laaja vertailu eri estimointimenetelmien välillä. Vertailussa käytettiin Koillis-Satakunnan Sähkön mittausdataa vuosilta 2006 ja 2007 yhteensä 52 kulutuskohteelta sekä lisäksi ulkolämpötilasta. Työ suoritettiin osin Tampereella Antti Mutasen, TUT, toimesta (Mutanen 2010) sekä osin VTT:llä (EMEFoecast-laskenta). TUT on vastannut datasta, kohteiden valinnasta, kaikista kuormitusmalleista sekä tulosten mallihyvyysvertailusta. Tässä raportissa tuloksia tarkastellaan nimenomaan ennustamisen, ei mallintamisen, kannalta, joten tältä kantilta esitetyt vertailut ovat VTT:n tuottamia. Tavoitteena on arvioida, kuinka hyvin eri mallit pystyisivät ennustamaan tietyn kohteen tietyn hetken kulutusta.

Kohteet ovat pääasiassa suora-, osittain varaavia tai varaavia sähkölämmitystaloja, jotka asiakastietojärjestelmässä on merkitty kuuluvaksi käyräjoukkoon:

Taulukko 1. Kulutuskohteiden käyrät

käyrä 1	= Sener110 (Huoneistokohtainen sähkölämmitys, käyttövesivaraaja <300 l)
käyrä 2	= Sener210 (Osittain varaava sähkölämmitys, pitkät sulkuajat)
käyrä 3	= Sener300 (Varaava sähkölämmitys)
käyrä 4	= Sener510 (Kaksoislämmitys, 1-aikatariffi)

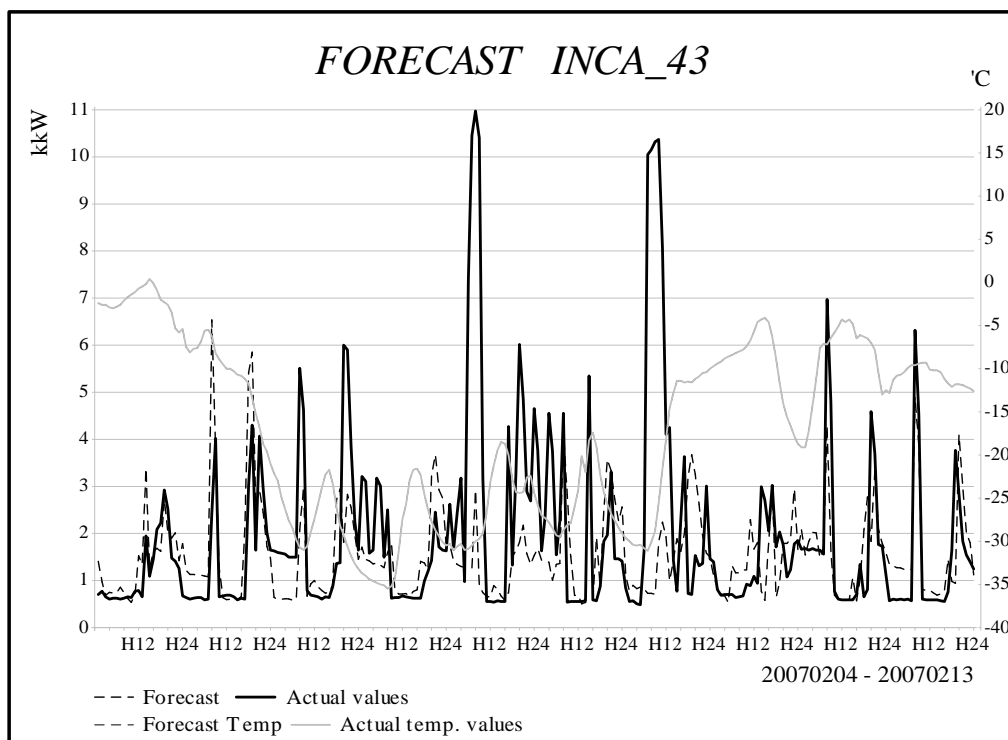
VTT:lle toimitetut mittausaikaasarjat oli skaalattu kuormitusmalleissa yleisesti käytössä olevaan 10 MWh vuosienergiaan sekä vuodelle 2006 että vuodelle 2007. Kaikki tarkastelut tehtiin näin skaalatuilla aikasarjoilla.

5.2 Kohteiden ja EME Forecast -ennusteiden tarkastelu esimerkein

Ennusteita arvioitaessa ja vertailtaessa käytetään yleensä numeerista analyysia, mutta ainakin allekirjoittaneen mielestä silmämääräinen tarkastelu antaa hyvin paljon enemmän. Kuvaajista nähdään kaikki kulutusanomaliat eli outoudet kuten yllättävät kulutusalenemat, poikkeavat mittausarvot, mutta nähdään myös tarkalleen missä kohdin ennuste on epäonnistunut jne. Tästä syystä seuraavassa esitetään jonkin verran ennusteen tuloskuvaajia. Esimerkkiennusteet on ajettu erilaisilla parametriasetuksilla d- ja d2- asetusten väliltä/läheltä.

5.2.1 INCA 43 -Omakotitalo, käyrä 1 (Sener 110)

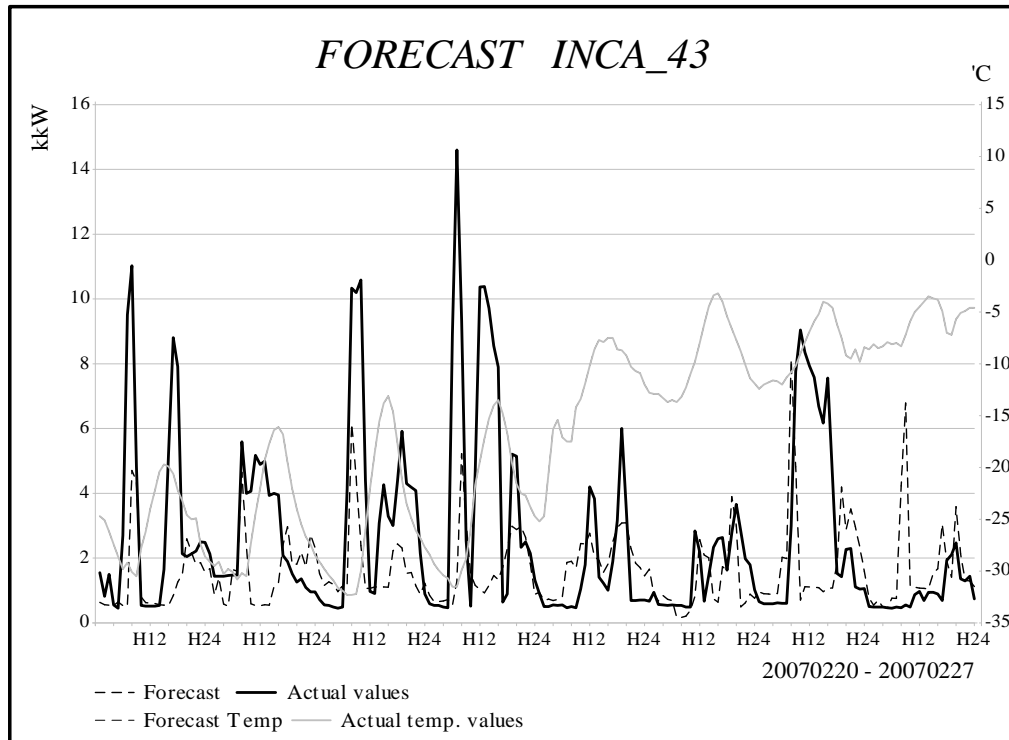
INCA 43:n vuosienergia on 6 MWh eli selvästi alle normaalin sähkölämmitystalon. Kohdetta ennustettiin 4.–13.2.2007, 20.–27.2.2007 ja 9.–16.3.2007. Helmikuun aikasarjasta (Kuva 4) nähdään selvät aamu- ja iltapiikit. Kova pakkanen näkyy yöaikaan tapahtuvana kohonneena sahailuna 7.–9.2., muttei esimerkiksi lauantaina 10.2. aamuyöllä. Piikkien rytmitys sopisi lämpimän käyttöveden käyttöön. Kohteessa voi olla sekundäärinen lämmönlähde kuten ilmalämpöpumppu, mikä selittäisi sahailun vasta kovimmilla pakkasilla. Kaksi suurinta piikkiä ovat yllätykselliset, sen näkee ennusteesta. Suurin ennustevirhe on noin 8 kW. Laskelmissa ja siten kuvissa ennusteulkolämpötila (Forecast temp) on sama kuin mitattu (Actual temp.values). Forecast ja Actual values ovat tehoja.



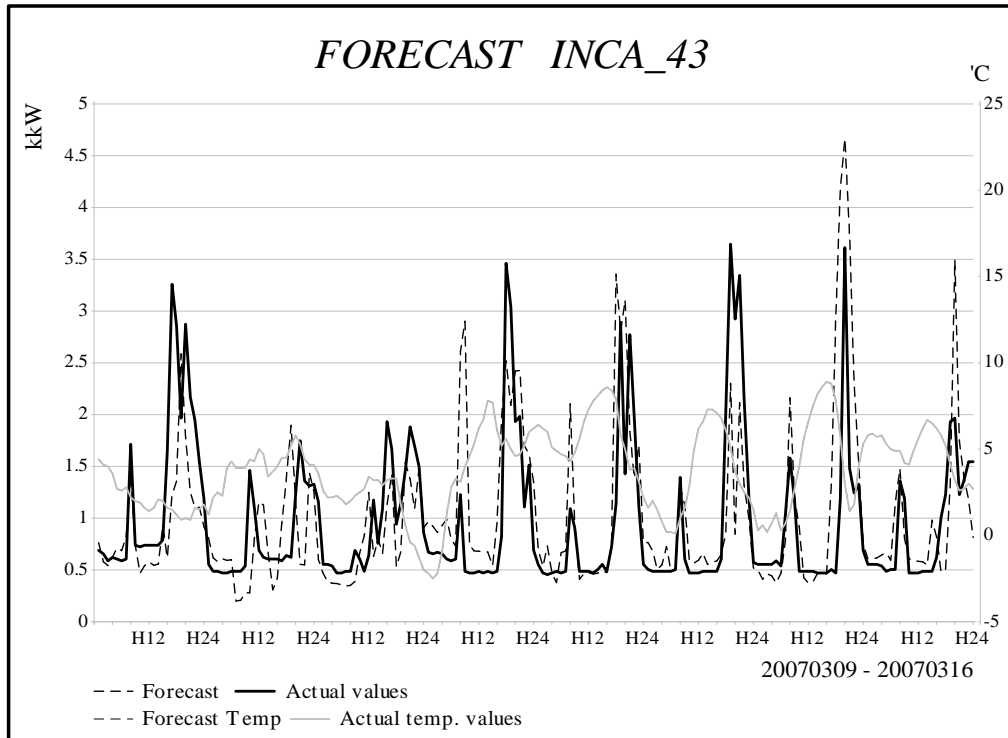
Kuva 4. INCA-kohteen 43 kulutus 4.–13.2.2007 sekä ulkolämpötilan kehitys ja EME Forecast ennuste. Huiput ovat aamupäivällä torstaina ja lauantaina. Työaikaan kulutus on hyvin tasaista.

Seuraavan pakkauskauden tilanne näkyy 20.–27.2.2007 kuvaajassa (Kuva 5). Pakkaskausi näkyy taas kohonneina piikkeinä. 21.–23.2. kulutuksesta puuttuu tavallinen työpäiväalenema kuten myös maanantaina 26.2. Ehkä kyse on hiihtolomasta?

Pari viikkoa myöhemmin kulutustaso on alhaisempi, kts. (Kuva 6). Arjen aamun kulutuspiikit ovat 1-1,5 kW kun ne kuukautta aikaisemmin olivat moninkertaiset. Pohjataso on pysynyt suurin piirtein samana, samoin iltapiikit, jotka tosin nyt dominoivat kulutustopografiaa.



Kuva 5. INCA 43 -kohteen toteutunut ja ennustettu kulutus sekä ulkolämpötila 20.–27.2.2007. Ensimmäinen päivä (20.2.) on tiistai.

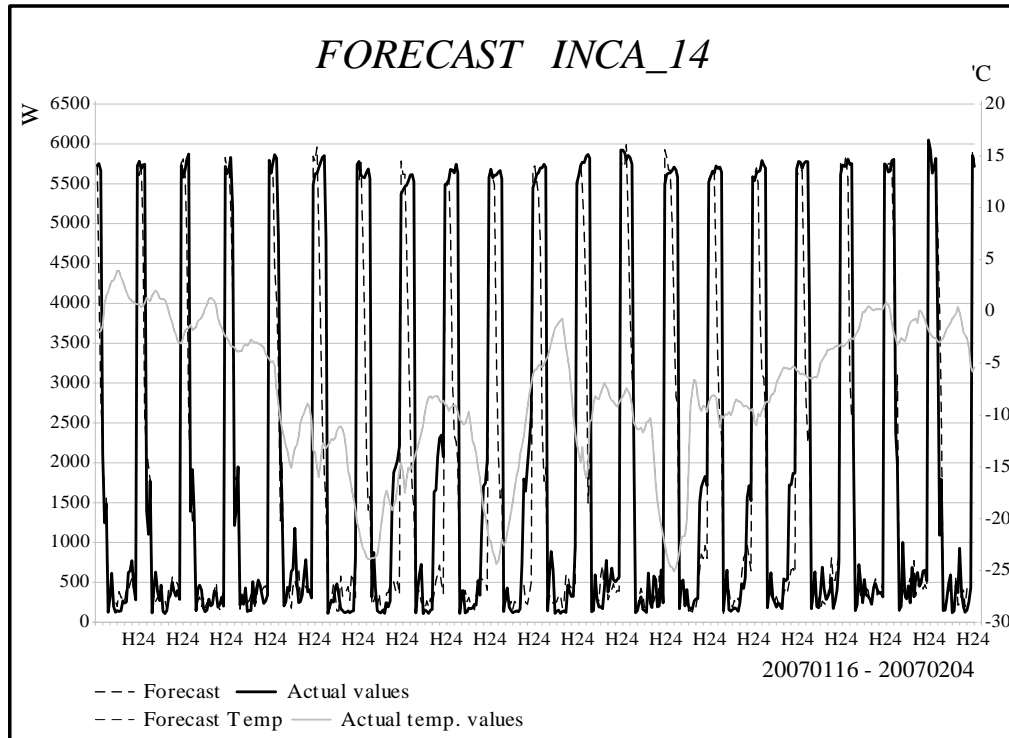


Kuva 6. INCA 43 -kohteen toteutunut ja ennustettu kulutus sekä ulkolämpötila 9.–16.3.2007. Regressiokorjaus aktivoitunut lauantaina 10.3. ja sunnuntaina 11.3.

5.2.2 INCA 14 -Omakotitalo, käyrä 4 (Sener 510)

INCA 14:n vuosienergia on 26 MWh eli tyypillinen sähkölämmitystalo. Valittu käyrätyyppi, 4, kertoo kohteella olevan yksiaikatariffi käytössä samoin kuin toista lämmön lähdettä. Kohdetta ennustettiin 16.1.–4.2.2007.

Kohteessa näyttää kuvaajan (Kuva 7) perusteella oleva puhdas varaava sähkölämmitys toisin kuin mitä ATJ:stä saatu käyrävalinta antaa ymmärtää. Kuvaajasta nähdään varaavan sähkölämmityksen ongelmallisuus eli sään kylmeneminen kasvattaa sähkön kulutusta leveyssuunnassa, ei pystysuunnassa. Toisaalta huippukuorman ennustaminen on kohtalaisen helppoa.

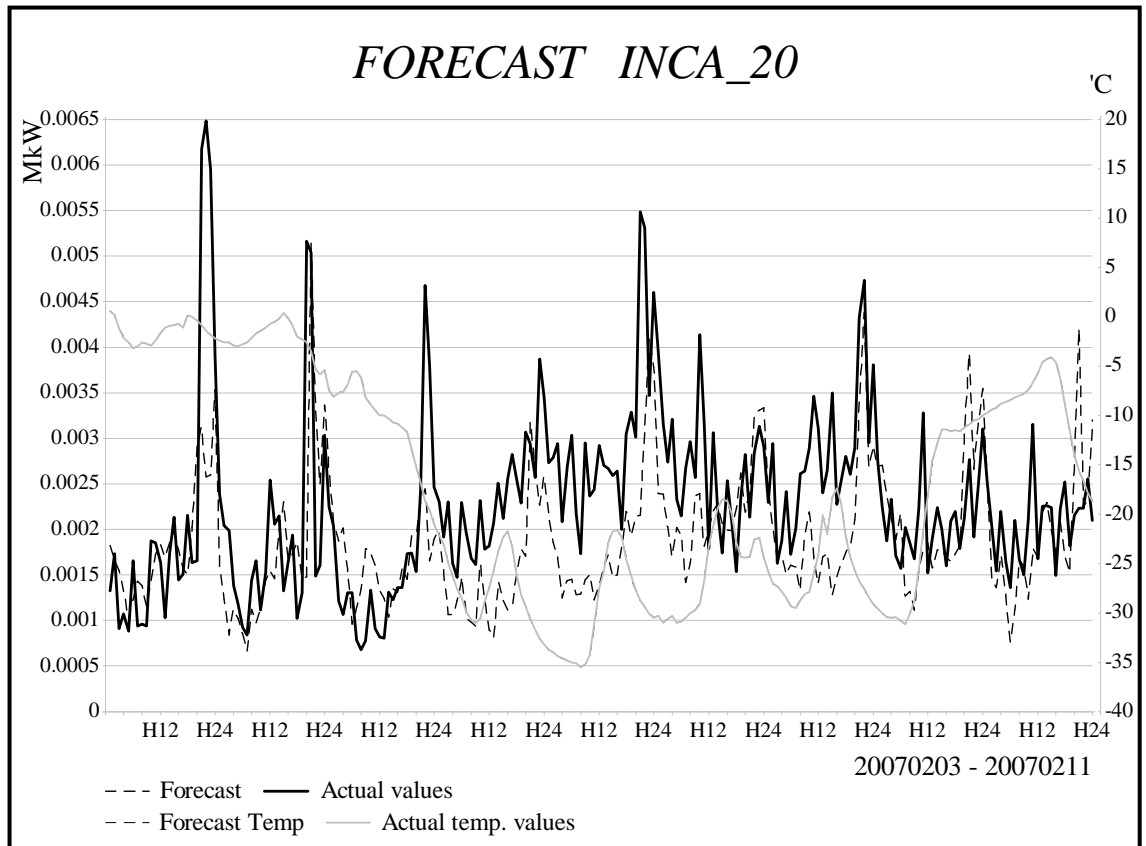


Kuva 7. INCA 14 -kohteen toteutunut ja ennustettu kulutus sekä ulkolämpötila 16.1.–4.2.2007. Tammikuun 16. päivä on tiistai.

5.2.3 INCA 20 - käyrä 3 (Sener 300)

INCA 20:n vuosienergia on 14 MWh. Kohdetta ennustettiin 3.–11.2.2007. Valittu käyrätyyppi, 3, on varaava sähkölämmitys. Kohteessa lämmitys kytkeytyy selvästi päälle klo 23, samoin kulutus reagoi sään kylmenemiseen nostamalla tasoaan kautta linjan. Sahaava kulutus ja lyhykestoinen yölataus kovillakin pakkasilla antavat vaikutelman, että kyseessä voisi olla osittain varaava sähkölämmitys.

Kiinnostavinta kyllä, reilun viikon aikana suurin kulutushuippu on keskellä lämmintä kautta. EME Forecast on ajettu d2-asetuksilla. Ulkolämpötilan korjaus käynnistyy viikonloppuisin eli 3.2., 4.2., 10.2 ja 11.2.



Kuva 8. INCA 20 -kohteen toteutunut ja ennustettu kulutus sekä ulkolämpötila 2.-11.2.2007. 2.2. on perjantai.

5.2.4 INCA 61 - Omakotitalo, käyrä 1 (Sener 110)

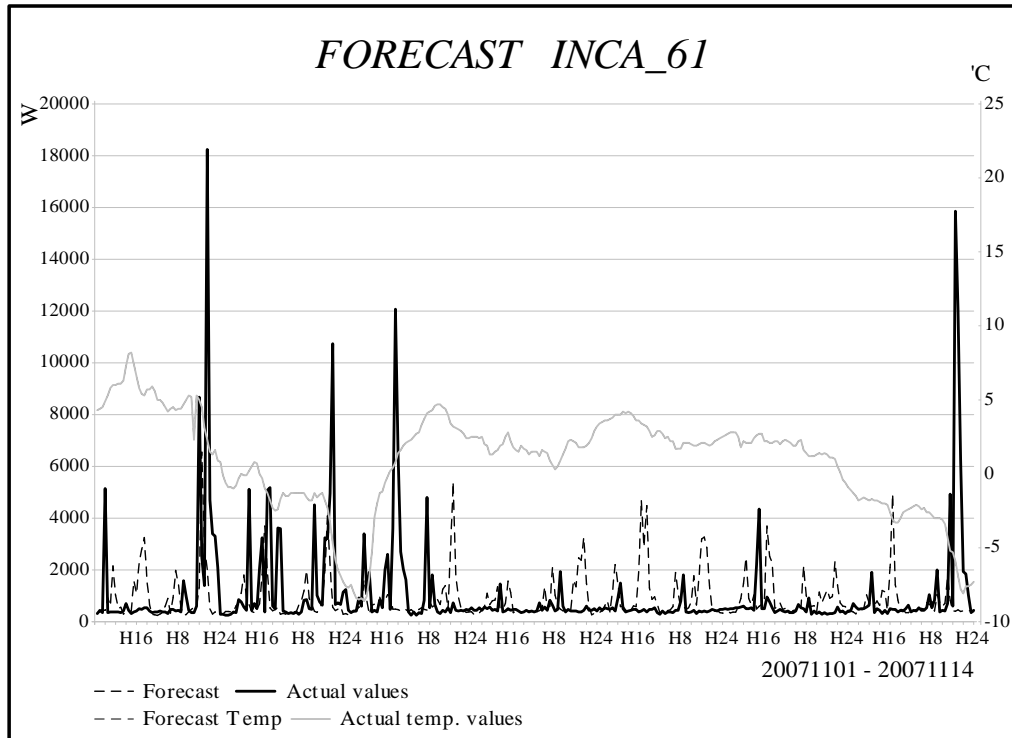
INCA 61:n vuosienergia on 3 MWh. ATJ:ssa valittuna olevalle käyrätyypille, 1 eli huoneistokohtainen sähkölämmitys kuumavesivaraajalla, kulutustaso on hyvin alhainen. Kohdetta ennustettiin 1.–14.11.2007 ja 21.–26.12.2007.

Kuvassa (Kuva 9) esitellään ensimmäisen ennusterupeaman tuloksia. Kuvasta ei saa sellaista käsitystä, että kulutus kovinkaan paljon seuraisi lämpötilaa. Lämpimän käyttöveden käyttö ja mahdollisesti saunominen voisivat olla pienten ja suurten piikkien takana. Kuvassa nähdään myös miten vaikeata tällaista satunnaista kulutushuippua on ennustaa.

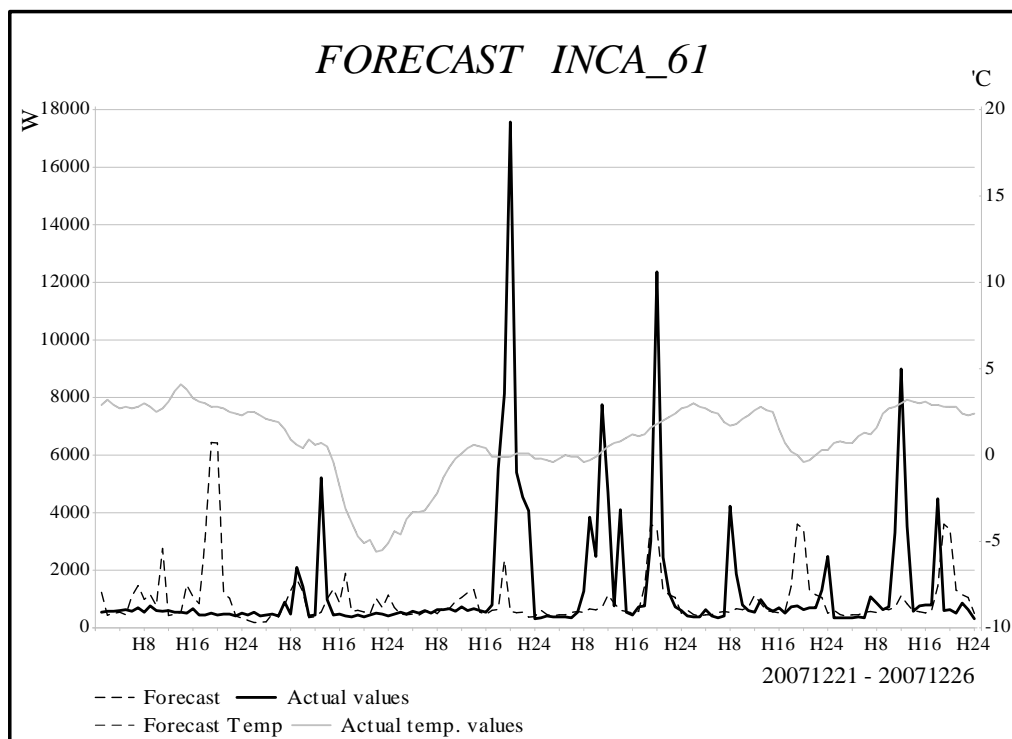
Ennusteväli 21.–26.12.2007 (Kuva 10) on varsin mielenkiintoinen, koska se pitää sisällään joulun. Jouluaatonaaton aattona paistetaan ehkä kinkkua ja saunotaan ja joulunaattona syödään ehkä riisipuuroa lounaaksi. Pieni lämpötilakuoppa ei aiheuta kummempia reaktioita kulutuksessa.

5.2.5 Johtopäätöksiä esimerkeistä

Asiakastietojärjestelmässä oleva asiakkaan luokitustieto ei aina tunnu vastaavan kulutusprofiilia. Ulkolämpötilan vaikutus sähkölämmitykseen ei käyriä katsellessa aina ole kovin selvä, looginen tai johdonmukainen. Kulutuspiikit ovat usein melko stokastisia.



Kuva 9. INCA 61 -kohteen toteutunut ja ennustettu kulutus sekä ulkolämpötila 1.-14.11.2007. Tässä on jo hyvä muistaa, että oikea teho on noin kolmasosa näissä kuvissa olevasta skaalatusta tehosta. 1.11. on torstai ja 14.11. on keskiviikko.



Kuva 10. INCA 61 -kohteen toteutunut ja ennustettu kulutus sekä ulkolämpötila 21.-26.12.2007. 21.12. on perjantai.

5.3 Kulutuskohdekohtaisten estimaattien virheet

5.3.1 Ennustemallit INCA ja EME Forecast

Vertailukohtaan muodostavat kulutuskohtaisilla estimointimalleilla (INCA ja EME Forecast) aikaansaadut ennusteet. Tässä yhteydessä molempia voidaan pitää ennustemalleina. Estimaattitulokset on esitetty taulukoissa (Taulukko 2) ja (Taulukko 3).

Esitetyt virhearvot ovat kaikkien kohteiden virheiden keskiarvoja. Kohteen virhearvot lasketaan seuraavasti (Mutanen 2010a):

- Virheen keskiarvo: Keskiarvo toteutuneen ja ennustetun kuorman erotuksen itseisarvosta.
- Maksimivirhe: Maksimi toteutuneen ja ennustetun kuorman erotuksen itseisarvosta.
- Huipun virhe: Ennustetun ja toteutuneen maksimikuorman erotus.
- Huipun aikainen virhe: Ennustetun ja toteutuneen kuorman erotus valtakunnallisessa maksimikuormitustilanteessa (vuoden 2007 tunnilla 899).
- Pohjan aikainen virhe: Ennustetun ja toteutuneen kuorman erotus valtakunnallisessa minimikuormitustilanteessa (vuoden 2007 tunnilla 5357).

Virheen neliösumma ja keskiarvo kertovat estimaatin yleisestä osuudesta tarkkuudesta. Neliösumma painottaa suuria virheitä. Maksimivirhe ei kerro kovinkaan paljon. Huipun virhe kertoo usein enemmän kulutuskohteen stokastisuudesta kuin estimointimenetelmän hyvyydestä, mutta toisaalta se voi myös kertoa kuinka hyvin estimaatti ottaa ulkolämpötilan tai viikkorytmin huomioon. Mikäli kulutuskohteen huippu kiinnostaa, kannattaa se hakea suoraan historiasta eikä käyttää mallien keskivertopohjaisia menetelmiä. Huipun aikainen virhe on hyödyllinen esimerkiksi verkon kapasiteetilaskelmissa.

Taulukko 2. INCA-kuormitusmallien tarkkuudet (Mutanen 2010a)

Keskimääräiset ennustevirheet (W)	INCA malli 1 a) (käytössä vuoden 2006 kuormitus- ja lämpötilamittaukset)	INCA malli 1 b) (käytössä vuoden 2006 kuormitus- ja lämpötilamittaukset sekä edellisen päivän lämpötilamittaus)	INCA malli 2 a) (käytössä vuoden 2006 kuormitus- ja lämpötilamittaukset)	INCA malli 2 b) (käytössä vuoden 2006 kuormitus- ja lämpötilamittaukset sekä edellisen päivän lämpötilamittaus)
Virheen neliösumma (10 ⁹ W ²)	4,86	4,59	5,36	5,10
Virheen keskiarvo	469	452	490	474
Maksimivirhe	5210	5192	5536	5386
Huipun virhe	-2621	-1613	-858	-465
Huipun aikainen virhe	-1202	-555	-1254	-629
Pohjan aikainen virhe	80	96	80	96

Tuloksista nähdään, että INCA-malli 1b antaa parhaimman estimaatin. Sen mukaan arkipäivien luokitus pelkästään arkipäiviin on parempi kuin jako kukin omalle viikonpäivälleen. Lämpötilan ottaminen mukaan ei paranna ennusteiden virheen neliösummaa tai keskiarvoa kovinkaan paljon, vain noin 3-5 %. Huipun virhe ja huipunaikainen virhe sen sijaan pienenevät merkittävästi. Pienin huipun virhe löytyy 2b-mallista, mikä selittynee saunahuippujen paremmalla paikannuksella.

Taulukko 3. EME Forecast-ennusteiden tarkkuudet (Mutanen 2010a)

Keskimääräiset ennustevirheet (W)	EME Forecast a) (käytössä vain vuoden 2006 kuormitusmittaukset)	EME Forecast b) (käytössä vuoden 2006 kuormitus- ja lämpötilamittaukset)	EME Forecast c) (käytössä kaikkien aikaisempien päivien kuormitusmittaukset)	EME Forecast d) (käytössä kaikkien aikaisempien päivien kuormitus ja lämpötilamittaukset)
Virheen neliösumma ($10^9 W^2$)	5,10	5,02	5,11	5,02
Virheen keskiarvo	477	472	477	470
Maksimivirhe	5326	5273	5313	5308
Huipun virhe	-1873	-1268	-2111	-1977
Huipun aikainen virhe	-1454	-1045	-1285	-1284
Pohjan aikainen virhe	66	52	35	24

EME Forecastin estimaatit ovat INCA-mallin antamia hiukan huonompia. Ulkolämpötilan mukaanotto parantaa tuloksia vielä vähemmän kuin mitä INCA-malleissa. Tämä selittyy sillä, että EME Forecastin dynaaminen ja tuntiarvopohjainen ulkolämpötila-algoritmi ei löydä hyväksyttäviä ulkolämpötilariippuvuuksia yhtä hyvin kuin INCA:n kausi- ja vuorokausienergiapohjainen tarkastelu. Huipun ja huipun aikaisen virheen kohdalla INCA 2b on selvästi parempi.

EME Forecast -tuloksia analysoitaessa huomio kiinnittyy myös tähän: käyttäen pelkästään vuoden 2006 mittaustietoja saadaan paremmat tulokset. Osaltaan tämä on selitettävissä sillä, että käytettäessä vuodentakaisia mittaustietoja vertailupäivien valinta ennusteohjelmassa on tasapuolisempi. Ennustettaessa esim. päivää 15.3.2007 voidaan hakea vertailupäiviä 15.2.–15.4.2006 väliseltä ajalta eli vuodenajan osalta molemmin puolin ennustettavaa päivää, kun taas tuoreilla mittauksilla ennustettaessa vertailupäivät laahaavat kalenterisyklisesti aina perässä. Tällä on merkitystä etenkin muutostilanteissa kuten keväisin ja syksyisin. Ulkolämpötila-algoritmi toimii myös hiukan paremmin laskettaessa molemminpuolisilla vertailupäivillä.

5.3.2 Bonustarkastelut

EME Forecast d2

EME Forecastin ennustetuloksia analysoitaessa heräsi kysymys, millaisia tuloksia saadaan kun parametreja säädetään yksittäiskohteille sopivimmiksi. Aikaisemmin esitetyillä d2- parametriasetuksilla saadaan taulukon (Taulukko 4) mukaiset tulokset.

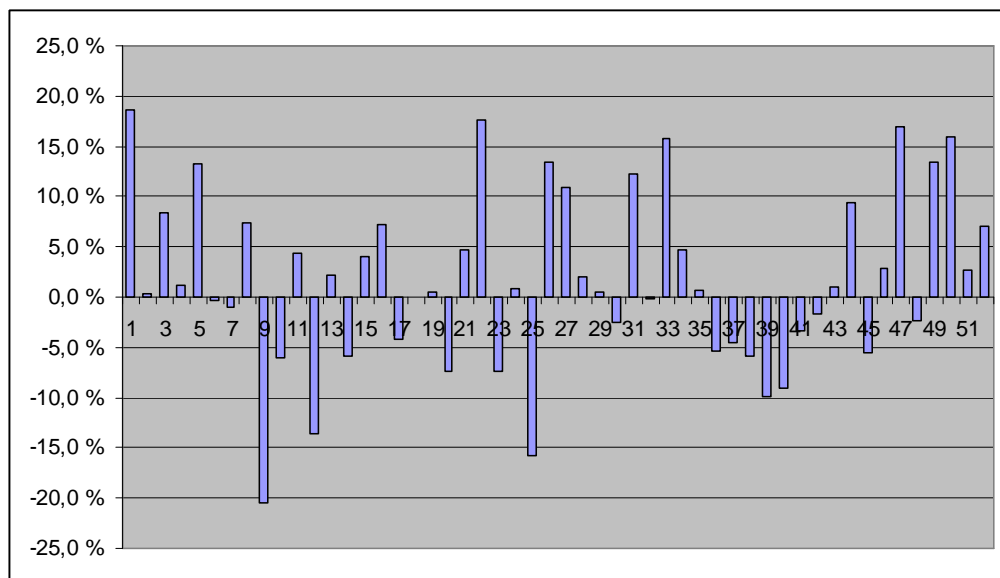
Taulukko 4. EME Forecastin ennustevirheet d2-moodissa.

Keskimääräiset ennustevirheet (W)	EME Forecast d) (vanha)	EME Forecast d2) (parannellut ohjausparametrit)
Virheen neliösumma ($10^9 W^2$)	5,02	4,95
Virheen keskiarvo	470	463
Maksimivirhe	5308	5308
Huipun virhe	-1977	-1435
Huipun aikainen virhe	-1284	-1108
Pohjan aikainen virhe	24	11

Tuloksista nähdään, että tulokset paranevat hieman. Huipun ja huipun aikainen virhe on edelleen aika kaukana INCA 2b:stä.

INCA oikeilla vuosienergioilla

Kuormitusmallien käyttö ennustamiseen vaatii lähtötietona myös vuosienergiannusteen. Edellä malleja on tarkasteltu kohdedatalla, joka on skaalattu 10 MWh vuosienergiaan sekä vuonna 2006 että vuonna 2007. Todellisuudessa vuosienergiat eroavat merkittävästi, katso (Kuva 11).



Kuva 11. Tutkittujen kohteiden vuosienergiamuutos vuodesta 2006 vuoteen 2007. ATJ:n mukaan esimerkiksi 10 ja 22 ovat vapaa-ajan asuntoja ja alapäikeistä 9 on käyrätyyppiä 2 ja 25 käyrätyyppiä 4.

Vuosienergiat muuttuvat paljon, jopa $\pm 20\%$, eivätkä muutokset suinkaan ole samansuuntaisia vaikka näin voisi olettaa sähkölämmitystaloista.

Ennustetilanteessa paras (ja tällä datajoukolla ainoa) vuosienergiatieto on vuoden 2006 toteuma. TUT:lta saatuja kuormitusmalliestimaatteja muutetaan siten että vuosienergiamuutos otetaan taas huomioon tuloksissa. Tämä saadaan aikaan kertomalla estimaatit vuosien 2006 ja 2007 vuosienergioiden suhteella. Tulokset on esitetty taulukossa (Taulukko 5). Ennustevirheet kasvavat, mutta vain hieman.

Taulukko 5. INCA-mallin estimointivirheet sekä vakiovuosienergioilla että muuttuvilla vuosienergioilla

Keskimääräiset ennustevirheet (W)		INCA 1 a)	INCA 1 b)	INCA 2 a)	INCA 2 b)
Virheen neliösumma ($10^9 W^2$)	Vakio 10 MWn vuosienergia	4,86	4,59	5,36	5,10
	Muuttuva 10 MWh vuosienergia	4,99	4,72	5,53	5,28
Virheen keskiarvo	Vakio 10 MWn vuosienergia	469	452	490	474
	Muuttuva 10 MWh vuosienergia	480	463	501	486
Maksimivirhe	Vakio 10 MWn vuosienergia	5210	5192	5536	5386
	Muuttuva 10 MWh vuosienergia	5172	5156	5557	5420

5.4 SENER ja INDE-kuormitusmallien estimaatit

Verrattaessa Senerin (SENER) ja paikallisen verkkoyhtiön käytössä olevien omien kuormituskäyrien (INDE) ennustevirheitä, kts. taulukko (Taulukko 6), kuluttajakohteisesti muodostettuihin estimaatteihin (EME Forecast ja INCA) nähdään, kuten odotettua, että yksilöidyt mallit ovat paljon tarkempia. Virheen neliösumma on puolitoistakertainen INDE-estimaateilla ja kolminkertainen SENER-mallituloksilla. Perinteisissä eli yleiskäyttöisissä kuormituskäyriissä ulkolämpötilariippuvuuden hyödyntäminen keskimäärin heikentää estimaatteja, vaikka kyseessä on pelkästään sähkölämmityskohteita. Huipun aikainen virhe on tosin ulkolämpötila huomioiden pienempi ja samoin huipun virhe, mikä osoittaa sen, että ulkolämpötilan ottaminen huomioon kovilla pakkasilla -odotetusti-parantaa sähkölämmityskohde-estimaatin osumatarkkuutta.

Taulukko 6. Perinteisten kuormituskäyrien estimaattitarkkuudet. Paikallinen INDE-käyrästä on selvästi tarkempi kuin SENERin mallit. Ulkolämpötila korjaus keskimäärin heikentää tuloksia, mutta huipun ja huipunaikaisen virheet pienenevät. (Mutanen 2010a)

Keskimääräiset ennustevirheet [W]	INDE a) (Lämpötilariippuvuutta ei huomioitu)	INDE b) (Käytetään -4 %/°C lämpötilariippuvuutta)	SENER a) (Lämpötilariippuvuutta ei huomioitu)	SENER b) (Laskettu Senerin v. 1992 raportissa mainittujen tammikuun lämpötilariippuvuuskertoimien mukaan)

Virheen neliösumma [10 ⁹ W ²]	7,71	8,18	15,07	15,66
Virheen keskiarvo	634	651	873	867
Maksimivirhe	5682	5981	6437	7563
Huipun virhe	-3193	-986	-1452	687
Huipun aikainen virhe	-1425	-497	-1672	-998
Pohjan aikainen virhe	266	304	-69	-51

6 Kohteiden summakulutusten ja kulutussummien estimaatit

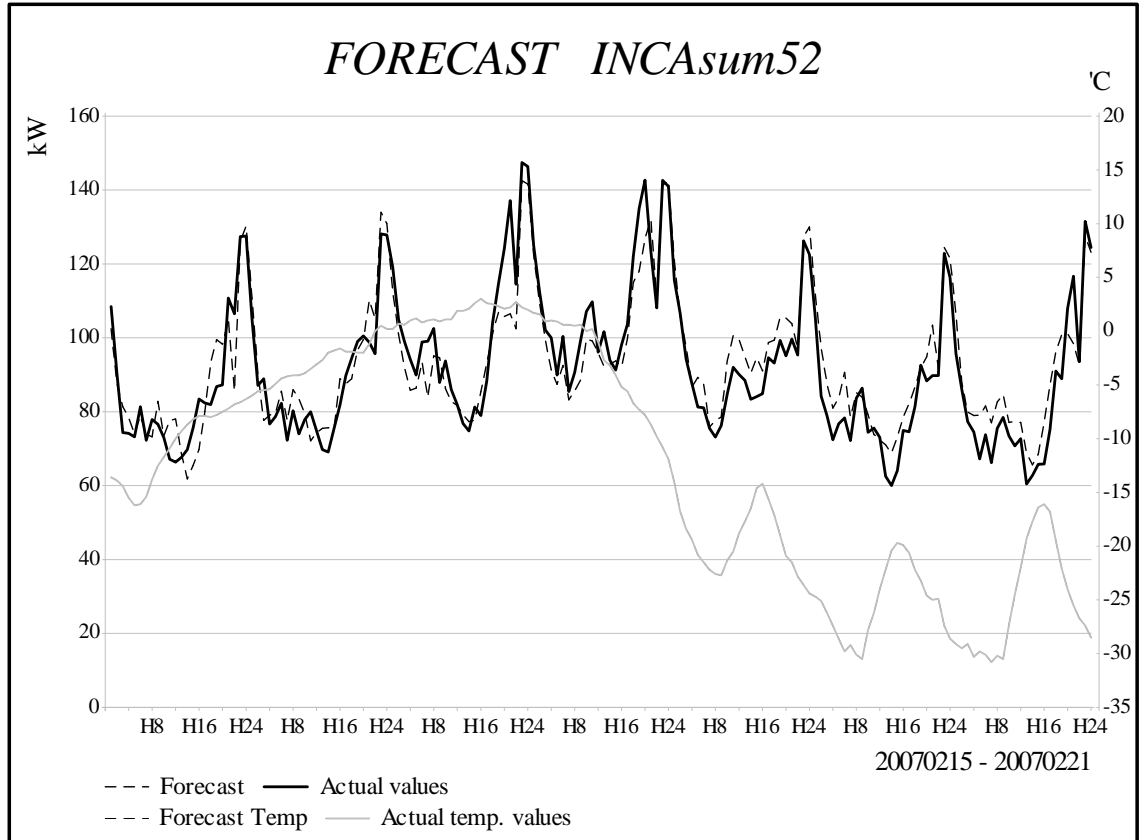
Mitä enemmän yksittäisiä kulutuspisteitä saadaan liitettyä yhteen, sitä enemmän kulutukset risteilevät, stokastisuus vaimenee ja suhteellinen estimointivirhe pienenee. Tässä luvussa tarkastellaan hieman tarkemmin 52 kulutuskohteen summattua kulutusta ja sen ennustamista ja verrataan tuloksia ennusteiden summiin. Summaukset on tehty 10 MWh vastaavilla aikasarjoilla, joten oikean vuosienergian mukaisilla aikasarjoilla tulokset voivat olla erilaiset. Nyt pienikulutuselliset kohteet saavat suhteettoman suuren painoarvon verrattuna suurkuluttajiin.

6.1 Summakulutuksen EME Forecast -estimaatit

Kuten yksittäiskohteiden kulutusestimaattien kanssa tehtiin, tarkastellaan summatehjojen käyttäytymistä ja ennustamista esimerkkien avulla. EME Forecast-ennusteet on tehty d-versiona, ellei toisin mainita.

Kuvassa (Kuva 12) on EMEForecastin summakulutuksen ennuste 15.–21.2.2007. Ennustetulos on silmämääräisesti ihan kelvollinen varsinkin ottaen huomioon loppupäivien jyrkästi kylmennyt sää. Kolmannen (lauantai 17.2.) ja osin myös neljännen (sunnuntai 18.2.) päivän ilta on ennustettu liian alhaiseksi. Joko saunaennustus ei ole onnistunut tai esim. varaavien järjestelmien lämpö ei ole riittänyt vaan lämmitys on napsahtanut päälle hiukan ennen yötariffia. Mielenkiintoista, että vastaavaa ei juuri tapahdu tätä seuraavan kahden todella kylmän päivän kohdalla. Kolmen viimeisen paukkupakkaspäivän kulutustaso on selvästi alhaisempi kuin alkuviikon lämpimillä säillä. Onko taloissa esimerkiksi ilmanvaihto puolittunut -15°C kohdalla?

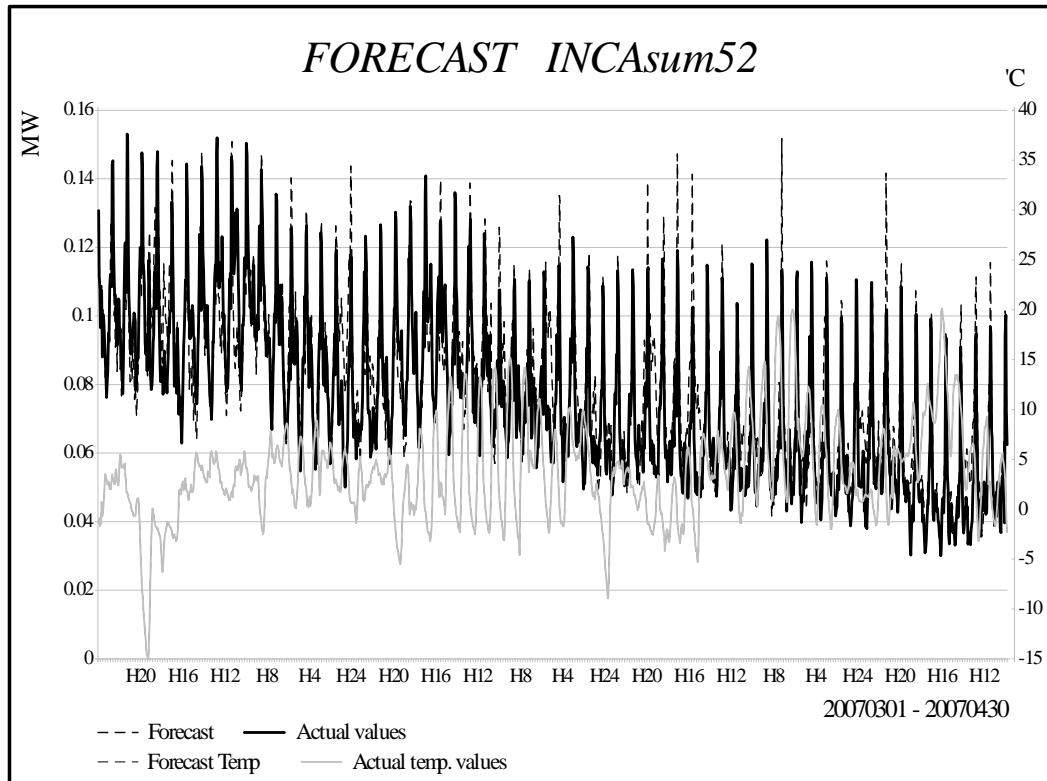
Kuvista (Kuva 12)-(Kuva 15) onkin kiinnostavaa tarkkailla vuorokausien pohjatehoja. Voisivatko hyvin hitaat aikavakiot kuten maapohjan kylmeneminen olla osaltaan selittämässä alimman tason muutoksia?



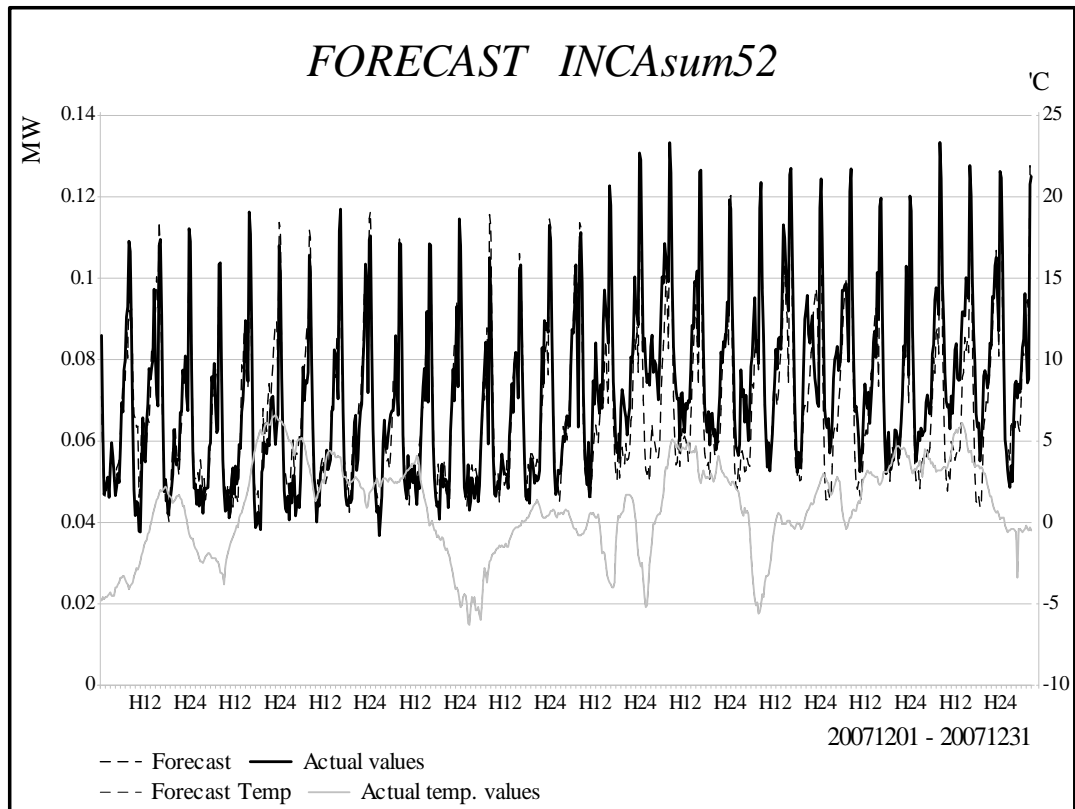
Kuva 12. Kaikkien 52 kohteen summakulutuksen toteuma ja ennusteet sekä ulkolämpötila välille 15.–21.2.2007. 15.2.on torstai.

Maalis-huhtikuun kuvaaja (Kuva 13) kertoo myös paljon. Kulutuksen taso muuttuu kevään edistyessä, vaikkei itse lämpötilassa tapahdu niin selkeitä muutosta. Auringon säteilytehon ja valaistustarpeen muuttuminen ovat suuria muutostekijöitä. Ennusteet on ajettu hiukan d2-asetuksista muutetuilla arvoilla.

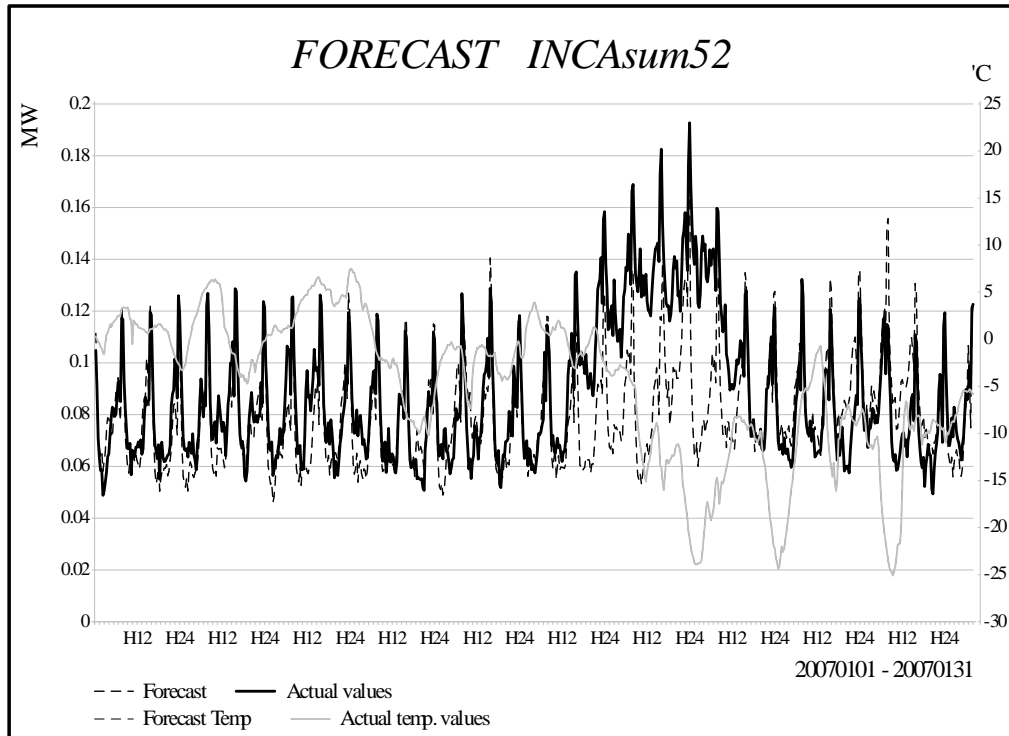
Seuraava esimerkki on joulukuu 2007 (Kuva 14). Ulkolämpötilan ja sähkönkulutuksen yhteys on tässäkin heikko, ennustemallissa korrelaatio ylittää 70 % vain harvoin. 18.12. alkava ja varsinkin 19.12. erottuva kulutuksen kasvu ei suoraan selity ulkolämpötilalla, koska vastaava lämpötiladippi noin viikkoa aikaisemmin ei aiheuta mainittavaa reaktiota. Ehkä kyse on jouluruokien valmistuksesta kuten perinteisestä kinkunpaistopäivästä, tai voihan olla että jonkun lämpöpumppu on hajonnut.



Kuva 13. Ennusteet maalis-huhtikuulle 2007. 1.3. on torstai.



Kuva 14. Summatehon ennusteet joulukuulle 2007. Joulukuun ensimmäinen on lauantai ja viimeinen päivä on keskiviikko.



Kuva 15. Ennusteet tammikuulle 2007 EMEForecast d-asetuksilla. Tammikuun ensimmäinen päivä on maanantai.

Tammikuu 2007 ennusteet ovat mielenkiintoiset. Mallin mukaan ulkolämpötilan ja sähkön kulutuksen korrelaatio on yleensä heikko, harvoin yli 70 %. Kuvassa (Kuva 15) nähdään, miten kulutus nousee usean päivän ajan. Tarkemmin katsottaessa nähdään, että kulutus ehtii nousta melkein pari päivää ennen kuin lämpötilan lasku alkaa. Lisäksi myöhemmät lämpötiladipit eivät lisää kulutusta lainkaan, päinvastoin.

6.2 Summakäyrien ja käyräsummien ennustevirheet

Yksittäisten kohteiden estimaatit ovat vaihtelevasti suurempia tai pienempiä kuin toteumat. Virheet menevät osin ristiin, joten kokonaisuuden absoluuttinen virhe on luonnollisesti yhtä suuri tai pienempi kuin osien absoluuttisten virheiden summa. Summakäyrien estimaatteja arvioidaan tässä suhteellisten virheiden itseisarvojen keskiarvoilla eli MAPE:lla (Mean Absolute Percentage Error):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_t \left| \frac{\hat{P}_t - P_t}{P_t} \right| \quad \text{missä } t \in 1, \dots, N$$

missä

P_t on tutkittava tuntitehototeuma t tuntina ja

\hat{P}^t vastaava estimaatti

N on tuntien lukumäärä ja

P voi olla joko yksittäisen kohteen arvo tai esimerkiksi kohteiden summa-arvo.

Esimerkiksi EME Forecast d2-ennusteella, kts. taulukko (Taulukko 7), yksittäiskohteiden MAPE on keskimäärin 66 % kun vastaavien ennusteiden summan MAPE on 13 %. INCA 1b-ennusteiden summan MAPE on 12 %.

Taulukko 7. Estimaattien summan MAPE (verrataan tieteenkin mittausten summaan) on noin 12-15 %, kun yksittäisen kohteen MAPE on esimerkiksi (EME Forecast d2) keskimäärin 66 %. Summakulutusta on lisäksi ennustettu EME Forecastilla tuloksena yllättävän iso haitari.

	INCA				EME Forecast	
	1a	1b	2a	2b	b	d2
Kohde-ennusteiden summa	14,7 %	11,6 %	14,9 %	11,9 %	12,8 %	13,0 %
Summa-kohteen ennuste					10,5 %	20,0 %

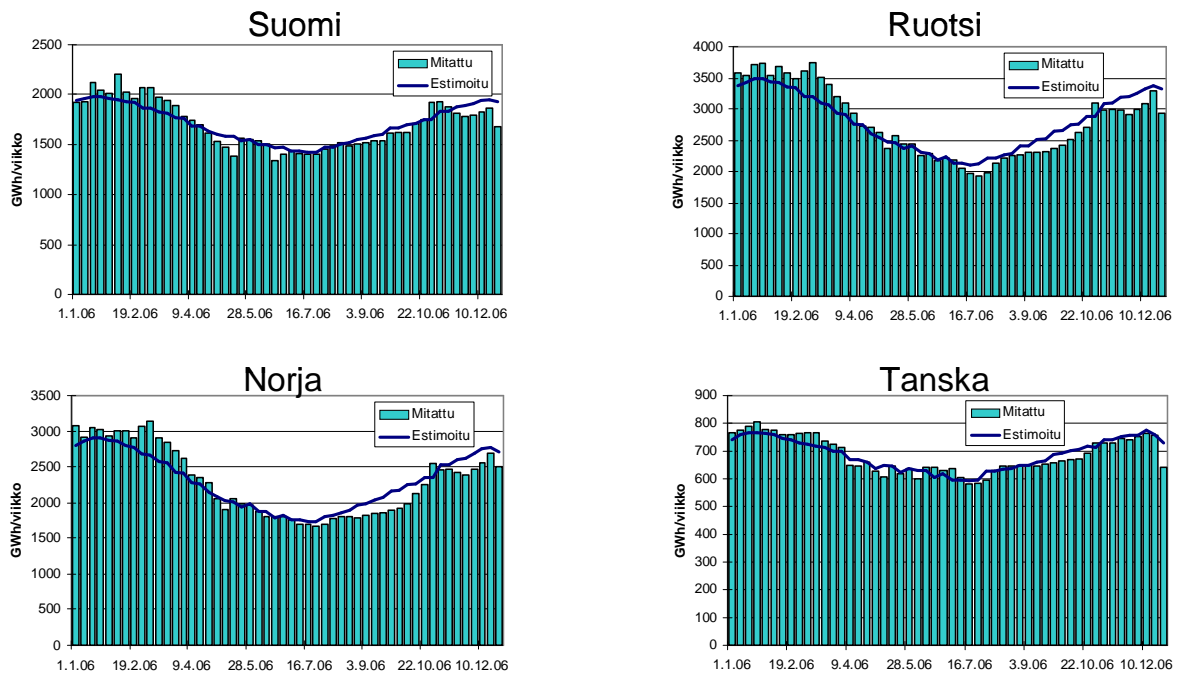
Kulutuskohdeiden summakulutuksen ennustevirhe EME Forecastilla on sekä kaikkein matalin, 10,5 % b-asetuksilla, mutta myös kaikkein suurin, d2-asetuksilla. 52 mittauskohteen perusteella on vaikeata tehdä johtopäätöksiä siitä, kannattaako esimerkiksi verkkoyhtiön kokonaiskulutusta ennustaa mittauskohde kerralla vai kokonaiskulutuksesta. Tässä on selvä jatkotutkimuksen tarve. Erilaisten -sekä kulutuskohdemäärän että -tyypin osalta- kulutuskokonaisuuksien estimointi ja tulosten analysointi antaisi arvokasta tietoa.

6.3 Maakohtainen kulutus kuormitusmalleilla

Verkkopisteiden kulutuksia estimoidaan kuormitusmalleilla, mutta vielä suurempia kulutuskokonaisuuksia voidaan myös estimoida. Kuormitusmalleilla pätee, että mitä enemmän on kohteita, sitä enemmän kuormitusten risteilyt tasoittuvat. Otetaan esimerkiksi Suomi. Asiakastietojen saanti koko Suomen kulutuskohteille ei ehkä onnistu, toisaalta suurteollisuutta ei ole mukana kuormitusmalleissa. Mallintaessa koko Suomen kulutusta kuormitusmalleilla hyödynnetään tilastoista saatavia sektorikohtaisia sähkönkulutustietoja ja osin myös tarkempaa tietoa. Tilastojen avulla muodostetaan heuristisesti eri kuormitustyypeille vuosienenergiat. Kuvassa (Kuva 16) on eri Pohjoismaiden aggregoidut kuormituskäyräpohjaiset (32 eri tyyppiä) kulutusestimaatit vuodelle 2006 verrattuna toteumiin. Vuonna 2006 oli Euroopassa laajasti kesällä lämpöaalto ja syksy oli hyvin lauha. (Koreneff 2009)

SALKKU-tutkimushankkeessa (Koreneff 2009) haluttiin tietää lisääntyvän määrän lämpöpumppujen vaikutuksia Suomen kokonaiskäyrään erityisesti huipputehon aikoihin. Sopivaa kuormituskäyrää ei löytynyt. SENERin käyrissä on yksi lämpöpumppukäyrä, mutta tarkempaa tietoa ei löydy edes lämpöpumpun tyyppistä. Oli aivan mahdotonta olemassa olevilla kuormituskäyrillä arvioida miten kulutus muuttuu huipputehon aikoihin jos esim. kaduilla on 200 000 sähköautoa, 200 000 sähkölämmittäjää siirtyy hyödyntämään ilma-ilma- ja ilma-vesilämpöpumppuja samalla kun 200 000 öljylämmittäjää siirtyy maalämpöpumppuihin ja osin ilmalämpöpumppuihin. Tehtävä ratkesi

muodostamalla osakuormille kätevät rakennuspalikat, joilla kokonaismalli joko kasvoi tai väheni.



Kuva 16. Kuormituskäyrillä estimoidut pohjoismaiset sähkön kulutukset vuonna 2006 verrattuna toteumiin. (Koreneff 2009)

7 Johtopäätökset

7.1 Muutokset toimintakentässä

Autojen sähköistyminen yleistyy Suomessa ja maailmalla lähivuosikymmeninä. Suurin osa työmatkoista ja päivittäisajeluista mahtuu melko hyvin sähköauton, jopa plug-in hybridin, akun kantosäteeseen, varsinkin jos myös työpaikalta löytyy latauspiste. Missä sähköautot ladataan? Esim. kotona, taloyhtiön tolppalla, työpaikalla, parkkipaikalla tai pikalatausasemalla. Kun mietitään yksittäistä kulutuspistettä, huomataan varsin pian, että vanhat kuormitusmallit eivät lainkaan mallinna sähköautoja. Tämä ei pelkäästään koske omakotitaloja, vaan kaikkia asumuksia ja työpaikkoja. Kulutuspisteessä voi myös olla useampia sähköautoja ja kun lisäksi eri sähköautotyypeillä on erilaiset lataustarpeet.

Suurimman ongelman kuormituskäyrien kannalta tosin muodostaa latausalgoritmi. Alkuvaiheessa auto ladattaneen heti pistokerasiakytkennästä, mutta älykäs lataus lienee pääasiallinen latausmuoto jo 2020 mennessä. Älykkään latauksen takana voi yksinkertaisimmillaan olla aikaohjaus, mikä helpottaisi mallinnusta, mutta hintaohjauksessa hyödynnettäisiin parhaiten Smart Gridiä ja kulutuksen ohjausta. Hintaohjaus, esimerkiksi spot- ja tasesäätöhintojen avulla, vaatii jo kuormitusmallinnukselta uudistumista. Latauksen kuormituskäyrään tarvitaan oma laskentamalli.

Lämmitysratkaisut monipuolistuvat. Useita lämmitys- ja jäähdytysmuotoja käytetään samassa kohteessa. Vanha suora sähkölämmitys saa ehkä rinnalleen ilma-ilmalämpöpumpun. Uusissa taloissa voi olla ilma-vesi-lämpöpumppu, poistoilmalämpöpumppu, maalämpöpumppu tai ilma-ilmalämpöpumppu. Sähköinen lattialämmitys on yleistä myös uusissa kaukolämmitetyissä yms. taloissa. Säätoratkaisujen suunnittelun ja virityksen virheet pyrkivät yleistymään lisäen sähkön kulutusta hyvin vaikeasti ennustettavalla tavalla Toisaalta entistä kehittyneempiä säätoratkaisuja otetaan käyttöön, esimerkiksi sääennusteen tai spothinnan perusteella tapahtuva etupainotteinen ohjaus. Kaikella tällä on vaikutusta sähkön kulutuksen suuruuteen ja sen ajoitukseen.

Tämän lisäksi asiakastietojärjestelmä yrittää pysyä mukana. Esimerkkien valossa ATJ:n asiakasluokitukset eivät välttämättä aina istu oikein. Kaikkia yksityiskohtia ei saada edes syötettyä järjestelmään, vaikka ne olisivat tiedossa, mutta useammin ne eivät ole edes tiedossa. Muutoksista ei usein ilmoiteta verkkoyhtiölle ja/tai sähköyhtiölle. Ilmalämpöpumppuja tullaan asentamaan vinhaa vauhtia seuraavat 10-20 vuotta. Sähköautoja ostetaan ilmoittamatta siitä sähköyhtiöille. Muutenkin sähköistyminen lisääntyy samalla kun yksittäisten laitteiden, varsinkin valaistuksen, sähkönkulutuksia tehostetaan ja vähennetään. Vuosienergiat tulevat muuttumaan rajustikin, mutta muutokset noteerataan vasta jälkepäin.

Eikä tässä kaikki. Pienmuotoinen sähkön tuotanto on kaikkien huulilla ja onkin odotettavissa, että aurinkosähköpaneelit ja pienet tuulimyllyt yleistyvät. Mikro-CHP kotitaloustasolla ei tosin liene mitenkään nopeasti yleistymässä Suomessa, vaikka kokeiluja on jo käynnissä joissakin kalliin loppukuluttajasähkön maissa.

7.2 Kuormitusmalleja koskevien hypoteesien tarkistaminen

7.2.1 Hypoteesi 1

SENERin 1990-luvun kuormitusmallit eivät kuvaa tämän päivän eikä tulevaisuuden kuormituskohteita Suomessa.

Vertailujen perusteella SENERin mallit eivät kuvaa olemassa olevia kuormia läheskään niin hyvin kuin uudemmat mallit (INDE) tai räätälöidyt kohdekohtaiset mallit (INCA) tai ennusteet (EME Forecast). Kysymys kuuluu, kannattaako lyhyen aikavälin estimoinnissa muuttua lähestymistapaa? Vaihtoehtona on esim.

- tuntimittauksista dynaamisesti kulutus pisteitä klusteroivat algoritmit, joita on myös tutkittu INCAssa Antti Mutasen ja Maija Ruskan toimesta (artikkeli jätetty sisään, Mutanen 2010b). Samalla päästään irti ATJ:n asiakasluokittelusta.
- kunkin kulutus pisteen kuormitusmallinnus/ennustaminen erikseen. Kuormitusmallien käyttö on nopeaa, joten suurienkin määrien kulutuskohtien estimointi ei liene ongelma. Mittausdataa on saatavilla, joten mittausdatan nopealla summauksella ja yhdellä ennusteajolla saadaan myös nopeasti ja vaivattomasti verkon pisteen kuin pisteen ennustettua.
- tarvittaessa huipun aikaista huipputehoa eivät nykyiset mallit ole kovinkaan paljon muita huonompia, esim. kaikkein pienimmän huipun aikaisen virheen esitti INDE-malli. Tosin parempaa arviota saanee katsomalla suoraan edellisvuoden huipun aikaista tehoa.
- verkon ja asiakaspisteiden tuntimittausten lisääntymisen myötä kuormitusmallien tuoma lisähyöty on vähentynyt verkon tai kulutus pisteiden tilan arvioinnissa. Asiakkaan kulutusta ei ehkä tiedetä tietyllä hetkellä, mutta mittaus tiedon avulla se voidaan ennustaa tai estimoida suoraan ilman kuormitusmalleja (esim. edellinen päivä, edellinen viikko tms. simppelellä menetelmällä).

Pitkän aikavälin tarkasteluissa ei voi hyödyntää klusterointialgoritmeja, sillä ne kuvaavat vain nykyistä kulutuskonfiguraatiota. Nykyiset kuormitusmallit ovat hiukan hyödyllisempiä, sillä asiakaskuntamuutokset saadaan otettua huomioon. Suurimmat pienkuluttajia koskevat muutokset (EV, lämpöpumput, DG) eivät kuitenkaan ole nykyisillä menetelmillä lainkaan arvioitavissa. Joko perustetaan liuta uusia kuormitustyyppiä tai siirrytään käyttämään apurakennuspalikoita ainakin sähköautoja ja lämpöpumppuja varten.

7.2.2 Hypoteesi 2

Kuormitusmallien luokittelu 46 tyyppiin ei ole riittävä.

Eivät ole. Suurimmat muutostekijät kuten sähköautot, hajautettu tuotanto ja erilaiset lämpöpumput eivät sovi nykyiseen jaotteluun. Joko lisätään kuormitustyyppiä tai lisätään kuormitukseen rakennuspalikoita. Tuotannon tyypit joka tapauksessa vaativat omat mallinsa.

Ongelmana lienee, että ATJ:ssa yhdellä kulutuspiisteellä voi olla vain yksi kuormituskäyräluokitus. Kannattaako antaa tämän rajoittaa mallien kehitystä? Ei kannata.

7.2.3 Hypoteesi 3

Kuormitusmallien nykyinen käyttöperiaate ei toimi tulevaisuuden Suomessa.

Ilman jotakin muutosta, esimerkiksi mallien määrässä, ei tulla pärjäämään. Mallien määrän muutos pitää itse asiassa olla melkoinen, jos halutaan käyttää yhtä kuormitusmallia per kulutuspiiste. Tarvittavasta mallien määrästä lisää myöhemmin.

Malleissa pitää voida olla negatiivisia kuormia eli esimerkiksi hajautettua tuotantoa. Tämä voi vaatia melkoisia muutoksia itse ohjelmiin, tosin tämä arvio on tehty ilman minkäänlaista varsinaista tietoa nykyisistä ohjelmista.

AMR:n mukana tuoman valtavan mittausaineiston hyödyntämättä jättäminen tuntuu myös tuhlaukselta. Vaikkei lisätä uusia kuormitustyyppisiä, pitäisi ainakin vanhojen kuormitustyyppien kuormituskäyriä päivittää uusiin mittauksiin perustuen, miksei jopa verkkoyhtiökohtaisesti paikallisesti. Tarvitaan työkaluja. Koska ATJ:sta asiakkaalle saatavan luokituksen taakse saattaa todellisuudessa kätkeytyä niin paljon muuta, tarvitaan myös luokitustunnistusalgoritmit jotka esimerkiksi päivittävät suoraa sähkölämmitystalon kuormitusmallia ainoastaan puhtaasti sähkölämmitystä käyttäviin mittauksiin perustuen.

7.3 Kuormituskäyrien lukumäärä

46 staattisella tai harvoin päivittyvällä kuormitusmallilla ei tulla pärjäämään seuraavan kymmenen vuoden aikana tapahtuvan kulutusmyllerryksen aikana. Voidaanko malleja lisätä? Kyllä vaan. Mallintaakseen edes jonkinlaisen kattavasti omakotikuluttajia tarvitaan esim. seuraavien neljän käyrän

1. ei sähkölämmitystä
2. suora sähkölämmitys
3. osittain varaava sähkölämmitys
4. varaava sähkölämmitys

tilalle koko joukon uusia tyyppisiä.

Edellä esitettyjä neljää esimerkkisähkölämmitysvaihtoehtoa voidaan yhdistää lisäksi lisälämmönlähdenvaihtoehtoihin

- ei lisälämmitystä
- ilmalämpöpumppu
- ilma-vesilämpöpumppu (lämmitys)
- ilma-vesilämpöpumppu (lämmin käyttövesi)
- poistoilmalämpöpumppu
- 60 % huipputehontarpeesta kattava maalämpöpumppu
- 100 % huipputehontarpeesta kattava maalämpöpumppu (lienee muuten yksi 46 peruskäyrästä, tosin kukaan ei taida tietää)
- aurinkolämpökeräin

sekä mahdolliseen lisäsähköntuotantoon

- ei sähköntuotantoa

- aurinkosähkö
 - muu vempain
- unohtamatta sähköautoja
- ei sähköautoa
 - täyssähköauto
 - hybridi
 - molempia

joten ollaan helposti $4*8*3*4 = 382$ kuormitusmallissa. Ja näissä ei ole vielä otettu huomioon sellaisia kulutuksen dynamiikoja kuten hintaohjausta, aikaohjausta, teho-ohjausta tai muuta kysynnän joustoa. Saataisiinko ikinä asiakkaat lajiteltua oikein ATJ:hin, kun jo nykyinen luokittelutarkkuus on riittävän haastava?

Entä pitkän aikavälin laskelmissa? Jos halutaan tietää kuormitus hiukan pidemmälle tulevaisuuteen esimerkiksi investointi- ja verkon riittävyysarviointeihin, olisi hyvä saada kaikki uudet kulutukset sekä kulutusmuutokset mukaan laskelmiin ja arvioihin. 382 omakotikuormitustyyppin lukumäärän tai vuosienergian kehityksen arviointi ei ole mitään juhlaa. Käyttäisikö kukaan tällaista suunnittelujärjestelmää?

Verkon ja asiakaspisteiden tuntimittausten lisääntymisen myötä kuormitusmallien tuoma lisähyöty on vähentynyt verkon tai kulutus pisteiden tilan arvioinnissa. Asiakkaan kulutusta ei ehkä tiedetä tietyllä hetkellä, mutta mittaustiedon avulla se voidaan ennustaa tai estimoida suoraan ilman kuormitusmalleja. Nopeutta tarvitsevilla tehtävillä kuormitusmalleja käyttäen saataneen nopeammin estimaatti aikaiseksi kuin ennusteohjelmalla, joka yleensä tarvitsee historia-aikasarjan haun tietokannasta.

Yksittäisen kulutus pisteen ennustaminen ei ole ikinä helppoa. Kulutus on hyvin stokastista eli satunnaisesti vaihtelevaa. Kulutuksen estimoinnissa sekä ennusteohjelmat että kuormitusmallit haparoivat. Mitä epätarkemmin yksittäistä kulutuskohdetta saadaan estimoitua, sitä vaikeampaa on verifioida esimerkiksi toteutuneet kysynnänjoustot suoraan mittauksesta.

7.4 Jatkotutkimus- ja kehityskohteita

7.4.1 Uudet kuormitustyyppit

Uudet kuormitukset kuten hajautettu tuotanto ja sähköautot tarvitsevat kokonaan uusia kuormituskäyriä. Uusien käyrien kehittäminen voisi paremmin perustua, ainakin osaksi, laskentamalleihin kuin puhtaasti mittaustietoihin. Kuormat ovat nimittäin luonteeltaan hankalia, esimerkiksi:

- täysin stokastisia (tuulivoima)
- riippuvat muusta selittäjästä kuin ulkolämpötila
 - a. auringon säteily (aurinkosähkö, aurinkolämpö)
 - b. lämmityksen ja lämpimän käyttöveden tarve (CHP)
- ovat ohjattavia (sähköauton lataus ja mahdollisesti tulevaisuudessa myös purkaus)

- lämpötilariippuvuus ei ole lineaarinen¹

7.4.2 Kuormitustyyppien automaattinen luokittelu

Kuormitusmalliohjelman rinnalle olisi hyvä saada ohjelma, joka mittaustietojen ja vuosien energian perusteella osaisi luokitella asiakkaan tyyppin ja ehkä myös tärkeimmät osakulutukset (lämpöpumput, sähköautot, hajautettu tuotanto, sähkökuias) vuosien energioineen sekä näiden mahdolliset ohjausmallit.

Oletetaan esimerkiksi suorälämmitteinen omakotitalo, jonka vuosien energia on 20 MWh. Ilmalämpöpumpun avulla vuosien energia esimerkiksi tippuu 13 MWh:iin, mutta huipputeho pysyy samana ja kesäkulutus voi hiukan kasvaakin. Vanhan kuormitusmallin käyttö uudella energialla antaa kovin väärän käyrän. Tai otetaan öljylämmitystalo, johon asennetaan maalämpöpumppu. Vuosien energia kaksin- tai kolminkertaistuu, mutta se ei tarkoita että vanha kulutushuippu kaksin- tai kolminkertaistuu. Uusi kuorma jakautuu suhteellisen tasaisesti lämmityskaudella.

7.4.3 Dynaamiset kuormitustyypit

Kuormituskäyrän (esim. 6*3*24 indeksiarvoa ja ulkolämpötilariippuvuudet) vaihtoehtona voisi olla hyödyllistä käyttää kuormitusalgoritmeja. Varaavan sähkölämmityksen mallintamisessa voitaisiin esimerkiksi hyödyntää algoritmia joka kasvattaa sähkön käyttöä leveyssuunnassa, eli pidentämällä varausaikaa, eikä pituussuunnassa eli kasvattamalla varaustehoa. Sähköautojen latausten tarve voi olla aikasarja mutta itse lataus algoritmisesti laskettava hintaohjauksen perusteella.

7.4.4 Rakennuspalikat ja rakennuspalikkamalli

Rakennuspalikka-ajattelun idea perustuu siihen, että asiakkaan sähkön kulutus ei ole vain yhtä kulutustyyppiä, vaan koostuu vaihtelevissa määrin monista erilaisista osakuormatyypeistä. Yhden asiakasluokan sijaan asiakkaalle tai asiakasjoukolle voitaisiin määrätä useampia. Kulutus muodostuisi näistä osista. Palikkamalliin saadaan hyvin mukaan esimerkiksi hajautettu tuotanto, sähköauto, lämpöpumput jne. Kunkin palikan koko estimoitaisiin kulutusmittauksista ja kohteiden ominaisuuksista koskevista tiedoista.

Otetaan esimerkiksi suora sähkölämmitystalo, johon on asennettu ilmalämpöpumppu. Meillä voisi olla useita tapoja kuvata asiakasrakennuspalikoiden avulla:

1. +taloussähkö
2. +suora sähkölämmitys
3. -ilmalämpöpumpun sähkön säästö

tai

1. +suora sähkölämmitteinen omakotitalo
2. - ilmalämpöpumpun sähkön säästö

tai

¹ Hyvin lämpimällä jäädytys on maksimissa. Lämpötilan laskiessa jäädytyksen määrä alkaa vähetä kunnes kokonaan lakkaa. Noin +15-17°C asteen lämpötilassa lämmityskuormat kytkeytyvät päälle. Alle -15°C asteen lämpötilassa usein ilmanvaihtoa vähennetään, jolloin lämpötilariippuvuus hiukan loivenee. Lopulta kun ollaan pitempiä aikoja mitoituksellisesti tai sen alle, on kaikki lämmitysteho käytössä. Vähän ajan päästä ihmiset voivat ottaa käyttöön lisälämmittimiä. Ilmalämpöpumppujen hyötysuhde (COP eli Coefficient of Performance) [ulkolämpötilan mukaan muuttuva, hyötysuhde]

1. +taloussähkö
2. +lämmin käyttövesi
3. +(lämmitystarve-ilmalämpöpumppulämpö) [=sähkölämmityksen osuus]
4. + ilmalämpöpumppulämpö*COP(ulkolämpötila)

8 Yhteenveto

Työssä tutkittiin varsin laajasti Koillis-Satakunnan Sähkön AMR-mittausaineistosta saadun 52 yksittäisen sähkölämmitystalon mittausten perusteella, kuinka hyvin perinteiset kuormitusmallit (SENER, INDE) vastaavat kuluttajakohtaisia kuormitusmalleja (INCA) tai geneeristä ennusteohjelmaa (EME Forecast). Tampereen teknillinen yliopisto vastasi omassa rinnakkaisprojektissaan kuormitusmalleista ja käytettävästä vertailudatasta sekä osasta tulosanalyysia.

Yksittäisen kuormituksen estimointi ei ole helppoa. Yleisvaikutelmana INCA ja EME Forecast antoivat toisiaan varsin lähellä olevia tuloksia, tosin INCAssa huomioitiin ulkolämpötilan vaikutuksia selvästi paremmin, mikä mm. näkyi pienempinä huipunaikaisina virheinä. Perinteiset kuormitusmallit jäivät pääsääntöisesti selvästi kohdekohtaisesti tehdyistä ennusteista/kuormitusmalleista.

Kulutuskohteita, sekä yksittäin että summana, tutkittiin myös otosluonteisesti eri aikaväleinä. Ulkolämpötila oli keskimääräisesti yllättävän huono selittävä tekijä näissä sähkölämmityskohteissa.

Kulutuskohteissa tapahtuu merkittäviä muutoksia lähivuosisikymmeninä. Lämpöpumput sekä lisäävät sähkön käyttöä (esim. öljylämmitteisissä taloissa) että vähentävät sähkön käyttöä sähkölämmitteisissä taloissa. Lisäksi tarvitaan uusia kuormituskäyriä mm. sähköautoille ja hajautetulle tuotannolle. Kysynnän aktivoituminen oman tuotannon, hintaohjauksen ja lisääntyvän ohjausautomaation ja ohjattavien kuormien myötä ja ehkä energiavarastojen avustamana (mm. vesivaraajat) tekee sen, että indeksipohjaisten kuormituskäyrien rinnalle tarvitaan esim. niitä täydentämään dynaamisiin käyriin pystyviä kuormituksen simulointi ja ennustusalgoritmeja. AMR:stä saadaan mittaustietoa, mutta asiakastietojärjestelmästä saadaan vain enemmän tai vähemmän puutteellista tietoa asiakaskunnasta. Varsinkin edellä mainitut suuret muutostekijät tuottavat oman problematiikkansa, eikä perinteisten kuormitusmallien lukumäärä, sisältö tai käyttö enää vastaa alati muuttuvan tulevaisuuden huutoon.

Raportissa hahmotellaan, mitä etuja on, että kuormitusmallinnuksessa siirrytään hyödyntämään myös osakuormitusrakennuspalikoita, joita ynnätään tai vähennetään, nykyisen kaltaisten kuormitusmallien rinnalla. Esim. omakotitalon sähkön kulutus voitaisiin koota kotitaloussähköstä, sähköauton latauksesta, suorasta sähkölämmityksestä, lämpimän käyttöveden lämmityksestä ja ilmalämpöpumpusta sekä negatiivisena kuormana lämpöpumpun säästövaikutuksesta suoraan sähkölämmitykseen. Aggregaattorille osakuormapalikkamallinnuksesta voisi olla merkittävää hyötyä: Osa palikoista ehkä reagoivat suoraan ohjaukseen, toiset ehkä hintaohjaukseen ja loput eivät reagoi ollenkaan.

Lähdeviitteet

- ADATO 2008. Kotitalouksien sähkön käyttö 2006. Tutkimusraportti 2.10.2008
- Koreneff, Göran, Ruska, Maija, Kiviluoma, Juha, Shemeikka, Jari, Lemström, Bettina, Alanen, Raili & Koljonen, Tiina. 2009. Future development trends in electricity demand. VTT Tiedotteita - Research Notes 2470. 2009. 79 s
- Mutanen, Antti. 2010a. Customer classification and load profiling based on AMR measurements. Research report (INCA-projekti, keskeneräinen).
- Mutanen, Antti, Ruska, Maija, Repo, Sami & Järventausta, Pertti. 2010b. Customer Classification and Load Profiling Method for Distribution Systems. Artikkelinä lähetetty IEEE Transactions on power delivery - lehteen elokuussa 2010.
- Seppälä, Anssi. 1996. Load research and load estimation in electricity distribution. VTT, Espoo 1996. VTT Publications: 289. 118 s. + liitt. 19 s.
- SLY 1992. Suomen Sähkölaitosyhdistys r.y.. Kuormitustutkimus 1992. 172 s.