

Varaavan sähkölämmityspopulaation optimointi

Olli Kilkki, Ilkka Seilonen

Aalto-yliopisto, Sähkötekniikan ja automaation laitos, PL 15500, 00076 AALTO

Puh. (09) 47001, etunimi.sukunimi@aalto.fi, <http://eea.aalto.fi/>

AVAINSANAT: sähkölämmitys, energiavarastot, optimointi

TIIVISTELMÄ

Uusiutuvien energialähteiden lisääntyessä ja sähköverkon muutenkin päivittyessä, on uudistuvaan sähköverkkoon tarkoitus saada älyä. Jatkossa sähköä voi liikkua kuluttajilta myös verkon suuntaan ja tavoitteena olisikin myös mahdollisuus säädellä verkon tasapainoa sähköntuotannon lisäksi ohjaamalla sen kulutusta, älykkäillä verkkoon kytketyillä laitteilla. Esimerkiksi varaava sähkölämmitys on hyvä esimerkki sähkönkulutuksen optimointiin, jossa käytetty energia ei vähene, mutta kulutushetket voidaan suhteellisen vapaasti valita. Kulutuksen ajankohtaan voidaan vaikuttaa muun muassa muokkaamalla kuluttajilta veloittettua sähkön hintaa tai ottamalla kuluttajien laitteet suurempaan kontrolliin. Tämä työ antaa esimerkkejä energiavarastojen lataamisen aikataulujen optimoinnista, hinnoittelulla ja suoralla ohjauksella, sekä kuluttajien että erityisesti sähköä myyvän yrityksen näkökulmasta. Kun kuluttajien sähkönkäyttöä ohjataan vaihtelemalla tunneittain niiden sähkön hintaa, syntyy peliasetelma, jossa sähkön myyjä yrittää maksimoida voittoa, kun taas kuluttaja minimoi kustannuksiaan. Tätä asetelmaa käytetään lähtökohtana ja optimoidaan kuluttajille annettavaa sähkön hintaa. Tämän lisäksi tutkittiin kuinka kuluttajien sähkövarastojen lataamiseen suoraan ja vaihtoehtoisesti sähkön hinnalla vaikuttaminen eroavat periaatteiltaan ja käytännössä, käyttäen kuluttajilta perittävänä hintana sähkön markkinahintaa.

1 JOHDANTO

Uusiutuvien energialähteiden lisääntyessä ja sähköverkon muutenkin päivittyessä, on uudistuvaan sähköverkkoon tarkoitus saada älyä. Kuluttajien omat sähköntuotantolaitteet sekä uudet kulutustarpeet esimerkiksi sähköautojen muodossa asettavat uusia haasteita sähköverkolle ja -markkinoille. Jatkossa sähköä voi liikkua kuluttajilta myös verkon suuntaan ja tavoitteena olisikin myös mahdollisuus säädellä verkon tasapainoa sähköntuotannon lisäksi ohjaamalla sen kulutusta, älykkäillä verkkoon kytketyillä laitteilla /1/.

Iso osa erityisesti talvella käytetystä energiasta kuluu lämmitykseen. Esimerkiksi varaava sähkölämmitys on erinomainen esimerkki sähkönkulutuksen optimointiin, jossa käytetty energia ei vähene, mutta kulutushetket voidaan suhteellisen vapaasti valita /2/. Lisäksi muut energiavarastot kuten sähköautot voidaan ottaa vastaavanlaiseen tarkasteluun /3/. Kulutuksen ajankohtaan voidaan vaikuttaa muun muassa muokkaamalla kuluttajilta veloittettua sähkön hintaa tai ottamalla kuluttajien laitteet suurempaan kontrolliin.

Tässä artikkelissa käsitellään energiavarastojen lataamisen aikataulujen optimointia, hinnoittelulla ja suoralla ohjauksella, sekä kuluttajien että erityisesti sähköä myyvän yrityksen näkökulmasta. Kun kuluttajien sähkönkäyttöä ohjataan vaihtelemalla tunneittain niiden sähkön hintaa, syntyy peliasetelma, jossa sähkön myyjä yrittää maksimoida voittoa, kun taas kuluttaja minimoi kustannuksiaan. Tätä asetelmaa käytetään lähtökohtana ja optimoidaan kuluttajille annettavaa sähkön hintaa. Lisäksi ohjataan tunnitista kulutusta alennuksilla. Tämän lisäksi tutkittiin kuinka kuluttajien sähkövarastojen lataamiseen suoraan ja vaihtoehtoisesti sähkön hinnalla vaikuttaminen eroavat periaatteiltaan ja käytännössä.

2 ONGELMAN OLENNAISET TOIMIJAT

2.1 Aggregoija

Tutkimusasetelmassamme oletamme tarkasteltavaksi kuluttajille sähköä myyvän yrityksen, joka ostaa päivän energiantarpeensa sähkömarkkinoilta. Tämä aggregoija ostaa siis Elspot-markkinoilta /4/ seuraavan päivän tunnittaisen sähköntarpeensa sen mukaan mitä sen asiakkaiden oletettu kulutus tulee olemaan. Tähän kokonaiskulutukseen voidaan voitaisiin vaikuttaa mm. muokkaamalla sähkön hintaa. Kun aggregoijalla on mahdollisuus vaikuttaa kulutukseen, se tietenkin yrittää siirtää kulutusta mahdollisimman halvaille tunneille.

Päivän sähkönkulutus voi kuitenkin toteutuessaan erota ostetusta määrästä, ja aggregoija joutuukin myöhemmin maksamaan takaisin tämän erotuksen. Vaikuttamalla toteutuneeseen kulutukseen voidaan näitä ylimääräisiä kustannuksia kuitenkin minimoida. Lisäksi tätä joustoa voidaan myydä säätösähkömarkkinoille ja samalla ottaa huomioon sähköä ostaessa /5/.

2.2 Kuluttaja

Kulutuksen ohjaamiseen erinomaisia kuluttajia ovat kaikki energiavarastoja sisältävät taloudet. Energiavarastoiksi voidaan laskea jopa yksinkertaisesti lämmitettävät asunnot, jossa osa lämpöenergiasta säilyy vaikka lämmitys hetkeksi katkaistaisiin. Eritoten jos lämmitys toteutetaan lämminvesivaraajalla, on kyseisen lämpövaraston lataamisen ajallinen siirtäminen toteutettavissa. Vastaavasti on sähköautoilla tai muiden kuluttajien sähkövarastoilla joustopotentiaalia.

Tässä työssä on kuluttajat – tai niiden käyttämä sähkönkulutus – jaettu kahteen ryhmään, joista toisessa on joustamaton kulutus, johon sähkön hinta tai muut vaikuttimet eivät toimi. Toinen osa kulutuksesta koostuu sähkövarastojen lataamisesta. Kuluttajat on mallinnettu itsenäisinä toimijoina, jotka minimoivat omia kustannuksiaan ja muuttavat kulutustaan aggregoijan pyynnöstä vain jos niiden omat kustannukset eivät muutu sen tuloksena tai saadessaan riittävän kompensaation. Kuluttajien kokonaiskulutusta ei siis muuteta, ainoastaan heidän sähkövaraston lataamista siirretään, kuitenkin niin että kuluttajien omat tunnittaiset lämmitys- ja muut tarpeet sekä rajoitukset otetaan huomioon.

3 KULUTUKSEN OHJAAMINEN

Oletuksena jatkossa esitettävissä simulaatioissa on että aggregaattorilla on tiedossa malli kuluttajiensa käyttäytymisestä. Aggregaattori tietää siis keskimääräisten kuluttajien sähkövarastojen koon, heidän tunnittaisen kulutustarpeensa ja maksimaalisen latauskapasiteetin. Aggregaattori arvioi myös tulevan päivän sähkömarkkinoiden tunnittaiset hinnat. Oletetun sähkön tuntihinnan perusteella aggregaattori minimoi kustannuksensa pyytämällä asiakkaat optimoimaan varastojensa latauksen spot-hintaan.

Tutkitaan kahta eri lähestymistapaa kulutuksen ohjaamiseen. Kuluttajilta voidaan periä joko vakiohintaa sähköstä ja ohjata kulutusta ns. suoraan /2/, tai vaihtoehtoisesti hinta voi vaihdella esimerkiksi tunneittain. Spot-markkinahintaan vertautuvaa hinta on yksi vaihtoehto kuluttajien ohjaamiseksi sopivaan kulutustasoon /6/. Kun kuluttajilta peritään tasaista hintaa, niillä ei ole preferenssiä millä tunneilla varaston lataaminen suoritetaan. Vastaavasti sähkön hinnan vaihdellessa, ne muuttavat kulutustaan aggregaattorin pyyntöjen perusteella kun saavat rahamäärän joka kompensoi muuttuneen kulutuksen. Molemmissa tapauksissa kuluttajilla oletetaan olevan laite, joka kykenee optimoimaan oman varastonsa lataamista annettuun sähkön hintaan ja vastaanottamaan aggregaattorilta pyyntöjä kulutuksensa muuttamiseen sekä päättämään siitä oman kustannuksensa muutoksille.

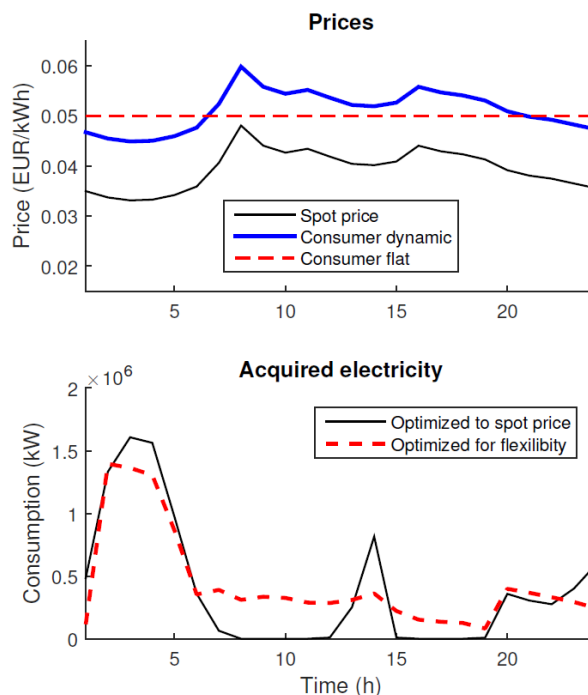
Jos kuluttajilta peritään jotain muuta hintaa heidän sähköstä kuin suoraa markkinahintaa, syntyy ns. peliteoreettinen asetelma. Tässä asetelmassa aggregoija ja kuluttaja yrittävät molemmat vaihtoehtoisesti maksimoida voittojaan ja minimoida kustannuksiaan. Kun aggregoija muuttaa sähkön tuntihintaa, muuttavat kuluttajat kulutuskäyriänsä, joka vaihtovuoroisesti vaikuttaisi aggregoijan markkinoilta ostaman sähkön määrään. Tätä kuluttajille tarjottavan sähkön hintaa optimoidessaan aggregoija voi saavuttaa hienoisia voittoja vaikka hinta rajoitettaisiinkin keskimäärin samaan kuin markkinahinta /7/. Tällä markkinahinnasta eroavalla ns. optimoidulla hinna saavutetaan etuja

erityisesti ennustettavuudessa, sillä sähkövarastokuluttajien käytös – ja siten niiden kuluttama energia – voivat muuttua huomattavasti pienilläkin muutoksilla sähkön hintaan.

Jatkossa esitettävissä tarkasteluissa kuitenkin oletetaan että kuluttajilta peritty sähkön hinta on suoraan markkinahinta, joka on ennustettu oikeaksi. Tämä oletus on tehty, jotta voitaisiin suoraan tarkastella eri kulutuksenohjauslähestymistapoja. Se, että ohjataan kulutusta vaihtelevalla sähkön hinnalla vai suoraan ohjaamalla kulutusta, vaikuttaa siihen että kuinka hyvin kulutusta voidaan todellisuudessa ohjata. Lisäksi lopulliset kustannukset voivat muuttua, ja niiden jakautuminen aggregaattorin ja kuluttajan välillä. Näiden vaikutusten lisäksi tutkimme mahdollisuutta lisätä joustavuutta sähkövarastojen lataamisajankohtien muuttamisessa.

Kun kuluttajat optimoivat tarkkaan johonkin heille annettuun hintaan, voi kulutuksen muuttaminen jälkikäteen muuttua hankalaksi /8/. Lisäksi kulutus voi muuttua hyvin samankaltaiseksi, johtaen uusiin kulutuspiikkeihin /9/. Tämä lisäjousto toteutettiin stokastista ohjelmointia käyttäen. Aggregaattori käyttää malliaan kuluttajien hintakäyttäytymisestä apunaan, ja optimoi ostettavan sähkön määrää, siten että jokaisen tunnin epätasapainot hankitussa ja kulutetussa sähkössä saadaan optimaalisesti tasoitettua. Tasapainotus voidaan tehdä joko muuttamalla kulutusta tai myöhemmin maksamalla tasesähköstä. Näiden molempien määrää optimoidaan useiden kulutusskenaarioiden yli. Lopulta saadaan optimoitu kulutuskäyrä, joka takaa enemmän joustavuutta kuin suoraan hintaan optimoitu.

Kuva 1 näyttää sähkömarkkinoiden spot-hinnan sekä kuluttajilta perityt hinnat: tasaisen ja skaalatun spot-hinnan. Alempi osa kuvasta näyttää saavutetut kulutuskäyrät kun kuluttajat optimoivat spot-hintaan, sekä joustavuusoptimoinnin tulokset.

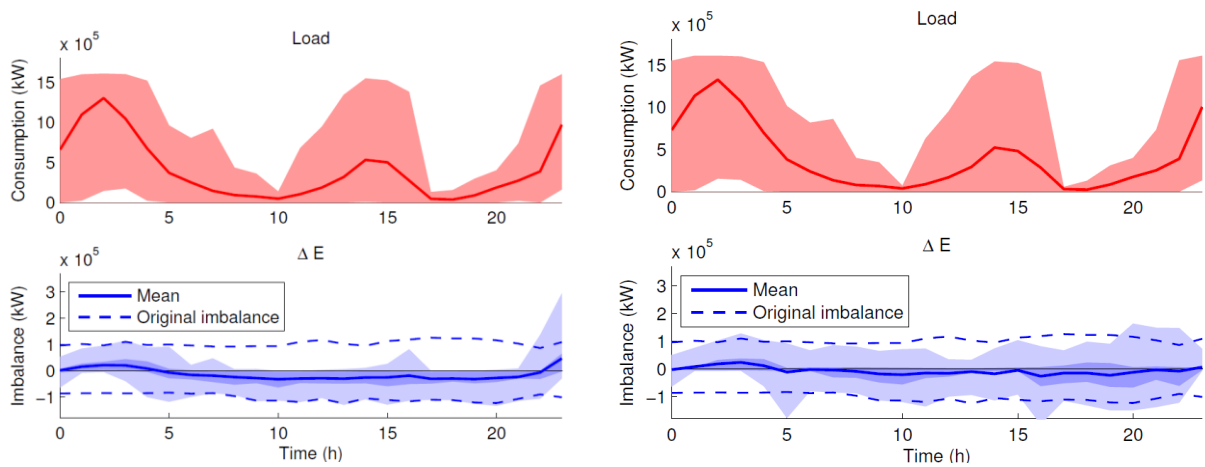


Kuva 1 Spot-hinta ja vakiohintaa, sekä kulutuskäyrät optimoituina spot-hintaan ja joustavuudelle.

4 SIMULOINNEISTA SAATUJA TULOKSIA

Seuraavaksi tarkasteltiin edelläsaatujen hankittavien sähkökäyrien käyttäytymistä päivänsisäisessä tarkastelussa. Simuloinneissa aggregaattorin sähkövarastojen lataamiseen kuluvan sähkön lisäksi kulutukseen lisätään satunnaisvaihtelua, joka voi johtua mm. muusta joustamattomasta kulutuksesta. Tätä tunnittaista epätasapainoa hankitussa ja kulutetussa sähkössä aggregaattori yrittää vähentää

vaikuttamalla kuluttajiensa käyttäytymiseen lähettämällä ohjauksia. Simuloitiin 90 päivää 100 kuluttajalla käyttäen oikeita spot- ja tasesähköhintoja /10/.



a) Tasainen hinta & suora ohjaus

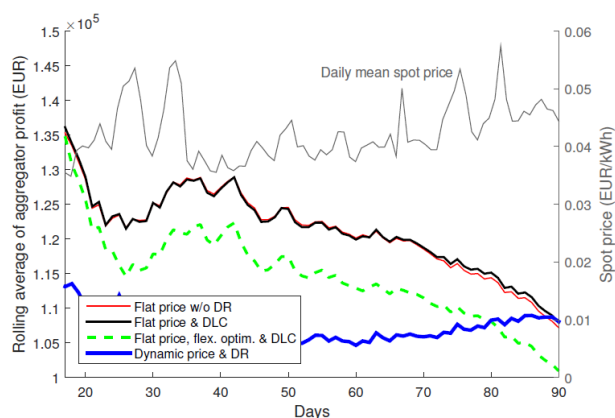
b) Spot-hinta ja insentiivit

Kuva 2 Kulutus- sekä epätasapainokäyrät ohjauksen jälkeen sekä katkoviivalla ennen ohjausta.

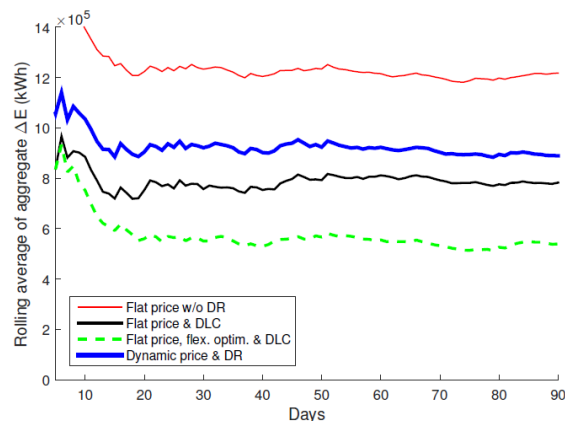
Kuvassa 2 nähdään ylhäällä kuinka kulutuskäyrät vaihtelevat eri simulaatioiden välillä. Vaihtelu johtuu osittain päivien välisestä vaihtelusta sähkön markkinahinnassa jonka vuoksi varastojen lataamista optimoidaan hieman eri tunneille. Alemmassa osassa näkyy kulutuksenohjauksen jälkeen jäljelle jääneen epätasapainon 50% ja 90% hajaumat, sekä alkuperäisen epätasapainon määrä.

Kuvassa 2 a) esitetään tapaus, jossa kuluttajien käyttäytymistä ohjataan suoraan kun niiltä peritään tasaista hintaa sähköstä. Nähdään kuinka useimmissa simulaatioissa monilla tunneilla alkuperäistä epätasapainoa ollaan saatu vähennettyä huomattavasti. Aamuyön ensimmäisillä tunneilla kulutusta ei saada lisättyä riittävästi jotta kaikki epätasapainot saataisiin poistettua. Vastaavasti, päivällä kulutusta ei voida vähentää, osittain koska silloin ei ole kovinkaan paljoa varastojen lataamista. Kuvasta 2 b) näemme vastaavasti tilanteen, jossa kulutusta yritetään tasapainottaa tarjoamalla kuluttajille palkkioita kulutuksen muuttamiseen. Nähdään ettei aivan samankaltaisia muutoksia saada aikaiseksi.

Lopputulokset simulaatioista nähdään Kuvassa 3, jossa Kuva 3 a) esittää aggregaattorin voittojen keskiarvon eri strategioilla simulaatioiden edetessä, sekä spot-hinnan vaihtelut. Kuluttajilta perittävä vakiohintaa on skaalattu, jotta voitot sekä vakio- että vaihtelevalla hinnalla konvergoituvat samaan arvoon tasapuolisen tarkastelun nimissä. Nähdään ettei suuria eroja tuloissa saavuteta päivänsisäisellä ohjauksella – tämänhetkisillä tasesähkön hinnoilla. Lisätty jousto pienempää näinollen tuloja vaikka vähentääkin selkeästi kokonaisepätasapainoa (Kuva 3 b).



a) Aggregaattorin voittojen keskiarvot



b) Jäljelle jäävä kokonaisepätasapaino

Kuva 3 Aggregaattorin suorituskyvyn mittareita eri strategioilla.

Vakiolla sähkön hinnalla kuluttajilla ei ole varsinaista preferenssiä varastojensa lataamiseen ja kulutusta voidaan siirtää vapaammin. Vastaavasti dynaamisella hinnalla osa markkinahinnan vaihtelun riskeistä siirtyy kuluttajille, mutta laskee ohjattavuutta hieman. Lisätyllä joustavuudella saavutettiin suurempaa joustavuutta voittojen kustannuksella. Taulukko 1 esittää eri lähestymistapojen suorituskyvyn eroja kuluttajien ja aggregaattorin näkökulmista.

Taulukko 1 Suorituskyvyn mittareita eri ohjauksen lähestymistavoille

Skenaario	Ohjattavuus	Asiakkaan kustannusten vaihtelu	Aggregaattorin voitot
Tasainen hinta ja suora ohjaus	++	-	+++
Hintaohjaus ja insentiivit	+	++	+++
Tasainen hinta ja joustavuusoptimointi	+++	-	+

5 YHTEENVETO

Uusiutuvien energialähteiden lisääntyessä ja sähköverkon muutenkin päivittyessä, on uudistuvaan sähköverkkoon tarkoitus saada älyä. Jatkossa sähköä voi liikkua kuluttajilta myös verkon suuntaan ja tavoitteena olisikin myös mahdollisuus säädellä verkon tasapainoa sähköntuotannon lisäksi ohjaamalla sen kulutusta, älykkäillä verkkoon kytketyillä laitteilla. Esimerkkinä tässä työssä esitetyissä simulaatioissa käytettiin varaavaa sähkölämmitystä vaikka muutkin energiavarastot sopisivat samanlaiseen tarkasteluun. Energiavaraston lataamisen ajankohtaan voidaan vaikuttaa muun muassa muokkaamalla kuluttajilta veloittua sähkön hintaa tai ottamalla kuluttajien laitteet suurempaan kontrolliin.

Tämä työ antoi esimerkkejä energiavarojen lataamisen aikataulujen optimoinnista, hinnoittelulla ja suoralla ohjauksella, sekä kuluttajien että erityisesti sähköä myyvän yrityksen näkökulmasta. Tutkittiin kuinka kuluttajien sähkövarastojen lataamiseen suoraan ja vaihtoehtoisesti sähkön hinnalla vaikuttaminen eroavat periaateiltaan ja käytännössä, ja saatiin selville kuinka kuluttajilta perittäessä tasaista hintaa voitiin periaatteessa saada enemmän joustoa kulutukseen. Hintaohjauksella tämä ohjattavuus jäi hieman vähäisemmäksi ja osa aggregoijan markkinahintojen vaihtelusta johtuvista riskeistä siirtyi kuluttajille. Lisäksi havaittiin, että lisääntyneellä joustavuudella ei siis tämänhetkisellä markkinahinnoilla saavuteta vielä tämän tarkastelun puitteissa kovin suuria tuloja aggregaattorille, kun sitä käytetään aggregaattorin oman kulutuksen tasaamiseen. Tarkastelussa jätettiin kuitenkin huomiotta mm. mahdollisuus osallistua myös taajuusohjaus- tai muille markkinoille lisääntyneellä joustavuudella. Näiden seikkojen lisäksi tässä työssä esitetyissä simulaatioissa huomioon ei otettu yleisiä säästöjä joita saavutettaisiin mm. ennustettavuudessa kun esitetynkaltainen optimointijärjestelmä otettaisiin käyttöön.

Jatkossa jatketaan mahdollisesti mm. joustavuuden tutkimista ja sen käyttöä myös taajuusohjausmarkkinoilla. Lisäksi skedulointi ja joustavuuden optimointi voitaisiin toteuttaa hajautetusti, jotta aggregaattorilla ei tarvitsisi olla minkäänlaista mallia kuluttajien hintakäyttäytymisestä. Käytännössä verrattavissa olevaa optimointia toteuttaa mm. Fortumin Fiksu - palvelu.

KIRJALLISUUSLUETTELO

1. Albadi, Mohamed H., and E. F. El-Saadany. "Demand response in electricity markets: An overview." *IEEE power engineering society general meeting*. Vol. 2007. 2007.
2. Ericson, Torgeir. "Direct load control of residential water heaters." *Energy Policy* 37.9 (2009): 3502-3512.
3. Kempton, Willett, and Jasna Tomić. "Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy." *Journal of Power Sources* 144.1 (2005): 280-294.
4. <http://www.nordpoolspot.com/TAS/Day-ahead-market-Elspot/>
5. Oh, HyungSeon, and Robert J. Thomas. "Demand-side bidding agents: Modeling and simulation." *Power Systems, IEEE Transactions on* 23.3 (2008): 1050-1056.
6. Patrick, Robert H., and Frank A. Wolak. Estimating the customer-level demand for electricity under real-time market prices. No. w8213. National Bureau of Economic Research, 2001.
7. Kilkki, O., A. Alahaivala, and I. Seilonen. "Optimized Control of Price-Based Demand Response with Electric Storage Space Heating." *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, Vol.11 , Issue.1, 2015
8. Lijesen, Mark G. "The real-time price elasticity of electricity." *Energy economics* 29.2 (2007): 249-258.
9. Mohsenian-Rad, A-H., and Alberto Leon-Garcia. "Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments." *Smart Grid, IEEE Transactions on* 1.2 (2010): 120-133.
10. <http://www.nordpoolspot.com/download-center/>