



Osaamista
ja oivallusta
tulevaisuuden
tekemiseen

Yannick Rousselle

Aurinkopaneelien tuotannon ohjaus energiaomavaraisuuden paranta- miseksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinöörityö

18.9.2020

Tekijä Otsikko	Yannick Rousselle Aurinkopaneelien tuotannon ohjaus energiaomavaraisuuden parantamiseksi
Sivumäärä Aika	44 sivua + 2 liitettä 18.9.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	energia- ja ympäristötekniikka
Ammatillinen pääaine	energiantuotantomenetelmät
Ohjaajat	lehtori Tomi Hämäläinen tuoteasiantuntija Linda Kangasmaa
<p>Opinnäytetyön aiheena oli aurinkopaneelien tuotannon ohjaus energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Työssä tarkasteltiin erilaisia aurinkopaneelien tuotannon ohjausratkaisuja, joiden avulla olisi mahdollista kasvattaa kotitaloudessa hyödynnettävän aurinkosähkön määrää. Tämä oman aurinkosähkön parempi hyödyntäminen parantaisi kotitalouden energiaomavaraisuutta ja vähentäisi ostettavan sähkön määrää. Nämä muutokset toteutuessaan tarkoittaisivat myös pienentynyttä kotitalouden energiankäytön päästöjä ja nopeutunutta investoinnin takaisinmaksuaikaa, sillä yhä suurempi osa energiantarpeesta toteutettaisiin aurinkosähköllä.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin kartoittavana tutkimustyönä aiheen toimeksiantajalle, Helen Oy:lle. Helen Oy:n kautta työssä oli mahdollista tutkia tarkasteltavien tuotannon ohjauskeinojen todellista toimintaa ja niiden avulla saatavia muutoksia. Työssä esiteltiin työn aiheen tarpeellisuus, aurinkopaneelijärjestelmä toimintaperiaatteineen, tuotannon ohjauskeinot ja todellisten hankkeiden tulosten pohjalta luotu yhteenveto.</p> <p>Aurinkopaneelien ylituotannolla tarkoitetaan sitä tuotantomäärää, joka ylittää kotitalouden energiantarpeen. Opinnäytetyössä kartoitettiin tuotannon ohjauskeinoja ja erilaisia kulutuskohteita, joihin ylituotantoa voitaisiin ohjata. Näistä erilaisista kulutuskohteista valittiin soveltuvimmat tarkempaan tarkasteluun, jotta saatiin tarkemmin analysoitua ratkaisun toteutuskelpoisuus.</p> <p>Opinnäytetyön johtopäätökseksi saatiin, että tarkasteltavista kulutuskohteista lämpimän käyttöveden tuotto ja sähköauton lataus olivat kannattavimmat kohteet ohjata aurinkopaneelien ylituotantoa. Käytännön hankkeiden mittaustulosten avulla todettiin, että työssä tutkittu releohjaus lämpimän käyttöveden tuottoon vähensi ostosähkön tarvetta. Ilta-aikaan tapahtunut käyttöveden lämmitys väheni, jolloin ratkaisun kannattavuus ja toimivuus saatiin varmistettua.</p>	
Avainsanat	aurinkopaneeli, Helen Oy, rele, energiaomavaraisuus

Author Title	Yannick Rousselle Solar panel power control to optimize energy self-sufficiency
Number of Pages Date	44 pages + 2 appendices 18 September 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Energy and Environmental Engineering
Professional Major	Energy Production Technologies
Instructors	Lecturer Tomi Hämäläinen Product Specialist Linda Kangasmaa
<p>The subject of this thesis was solar panel power control to optimize energy self-sufficiency. During this thesis, different solar panel power controlling methods were studied to increase the amount of solar energy used in the household. Better usage of solar energy would result in optimized energy self-sufficiency and a decreased amount of grid electricity purchased. When in action, these changes would also contribute to smaller energy usage emissions and an accelerated payback time due to even larger amount of energy usage would be covered by solar electricity.</p> <p>This thesis was executed as a surveying research work for the customer, Helen Ltd. Through the co-operation with Helen Ltd, it was possible to research the actual changes and results of power controlling methods studied in this thesis. In this thesis, the need for this subject, solar panel system with principles, power controlling methods and results based on real-life case examples were presented.</p> <p>Excess power production of solar panels is the amount of energy produced, which exceeds the energy need in the household. During the thesis, power directing methods and different energy using devices with possibilities to utilize solar panels overproduction were surveyed. From these different kinds of energy consuming appliances, the most suitable ones were selected for a closer look to allow more accurate analyzation of the solution.</p> <p>The conclusion of the thesis was that hot water production and electric vehicle charging are the most prominent areas, where it would be reasonable to direct solar panel overproduction. Real-life case examples showed that relay control of hot water production decreased the amount of electricity bought from the grid. Hot water heating with grid electricity decreased during evening times, which allowed concluding the functionality of the solution. Multiple different kinds of energy using appliances were reviewed and real-life test projects produced consistent results, compatible with the goals of this thesis.</p>	
Keywords	solar panel, Helen Ltd, relay, energy self-sufficiency

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Aurinkopaneelijärjestelmä	2
2.1	Aurinkopaneelijärjestelmän komponentit	3
2.1.1	Aurinkopaneeli	4
2.1.2	Vaihtosuuntaaja	6
2.1.3	Erotuskytkin	7
2.2	Aurinkopaneelien tuotanto	7
3	Aurinkopaneelien tuotannon ohjaus	9
3.1	Sähkömekaaninen rele	11
3.2	Kellokytkin	12
3.3	Älykäs ohjaus	12
3.3.1	Fronius Ohmpilot -ohjauslaite	13
3.3.2	Sähköauton latauslaitteet	13
3.4	Energiaomavaraisuuden parantaminen	15
4	Kuormanohjauskohteet	16
4.1	Lämminvesivaraaja	17
4.2	Sähköauton lataus	19
4.3	Maalämpö	21
4.4	Ilmalämpöpumppu	23
4.5	Muut lämpöpumppujärjestelmät	26
4.6	Sähkövarastot	26
4.7	Yhteenveto	28
5	Laskelmat	29
5.1	Ylituotanto ja lämminvesivaraaja	29
5.2	Ylituotanto ja sähköauton lataus	31
6	Käytännön hankkeet	34

6.1	Ensimmäinen tarkastelukohde	35
6.2	Toinen tarkastelukohde	38
6.3	Johtopäätös	38
7	Yhteenveto	40
	Lähteet	41
	Liitteet	
	Liite 1. Ensimmäinen tarkastelukohde - ostosähkön kulutus seurantavälillä	
	Liite 2. Toinen tarkastelukohde - ostosähkön kulutus seurantavälillä	

Lyhenteet

BEV	Battery Electric Vehicle. Viitataan täyssähköautoon, jonka voimalinja koostuu sähkömoottorista ja akustosta.
CO ₂ /kWh	Hiilidioksidin määrä kilowattituntia kohden. Viitataan yleensä energian tuotannon hiilidioksidipäästöihin tuotettua energiayksikköä kohden.
IRENA	International Renewable Energy Agency. Kansainvälinen uusiutuvan energian järjestö.
kWh	Kilowattitunti. Energian yksikkö, yhden kilowatin teholla toimiva vedenkeitin kuluttaisi tunnissa sähköenergiaa yhden kilowattitunnin verran.
MW	Megawatti on tehon yksikkö ja tarkoittaa miljoonaa wattia. Yleensä megawattit viittaavat suurien laitteiden tai voimalaitosten kulutukseen tai tuotantoon.
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle, ladattava hybridisähköauto. Ajoneuvo, jossa on kaksi voimalinjaa, polttomoottorin ja sähköauton voimalinja. Hybridiautoilla sähköinen toimintamatka on huomattavasti lyhyempi kuin täyssähköautoilla.
V2G	Vehicle to Grid. Sähköajoneuvo purkaa akkunsa energiasisältöä sähköverkon tarpeisiin, esimerkiksi osallistumalla sähköverkon taajuuden säätelyyn.
Wh/km	Wattituntia per kilometri. Sähköauton energiankulutus ajettua kilometriä kohden.

1 Johdanto

Opinnäytetyössä tarkasteltiin kuluttajapuolen aurinkopaneelijärjestelmien ylituotannon ohjausta erilaisiin kotitalouden kulutuskuormiin energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Opinnäytetyö toteutettiin tutkimustyönä Helen Oy:lle. Aurinkopaneelien ylituotanto on aurinkopaneelijärjestelmälle normaali ja toistuva tapahtuma, sillä aurinkopaneelien tuotanto on vaihtelevaa ja ajoittain epäsäännöllistä. Eri vuoden- ja vuorokaudenajat ovat sääilmiöiden ohella muutamia tekijöitä, jotka päivittäin vaikuttavat aurinkopaneelien tuotantoon. Opinnäytetyön tuloksien avulla voidaan tarkastella kuluttajapuolen aurinkopaneelijärjestelmien ylituotannon hyödyntämistä erilaisiin kulutuskohteisiin. Tarkasteltavien ratkaisujen avulla voisi olla mahdollista saavuttaa tehokkaampaa aurinkopaneelien tuotannon hyödyntämistä, parantunut energiaomavaraisuus ja nopeutunut aurinkovoimalahankinnan takaisinmaksuaika kuluttajalle.

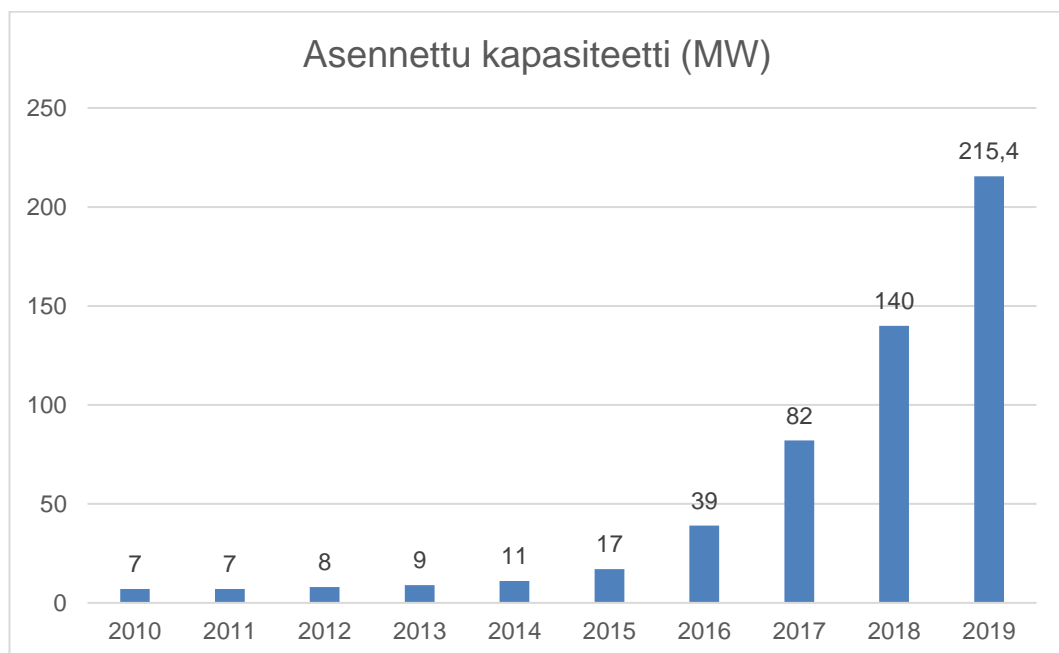
Oman aurinkopaneelijärjestelmän ylituotannon hyödyntäminen voidaan jo teknisesti toteuttaa sähkövarastoilla, mutta sähkövarastojen hinnat kuluttajille ovat toistaiseksi erittäin korkeita. Opinnäytetyössä keskityttiinkin etsimään ensisijaisena energiaomavaraisuuden parantamisen keinona tuotannon ohjausta, joka on kustannustehokas ja toimintavarma ratkaisu toteuttaa. Käytännössä ylimääräinen aurinkosähkö ohjattaisiin jollekin laitteelle käytettäväksi, jotta aurinkosähköä ei jouduta myymään sähköverkkoon. Opinnäytetyössä tarkasteltiin myös Helen Oy:n käytännön hankkeiden kautta saatuja mittaus-tuloksia tuotannon ohjauksesta. Käytännön hankkeiden avulla saadut tulokset antoivat mahdollisuuden tarkastella opinnäytetyössä esiteltyjä tekniikoita käytännössä.

Opinnäytetyössä tarkastellaan ensin aurinkopaneelijärjestelmiä ja niihin liittyviä tuotannon ohjauksen laitteita, komponentteja ja tekniikkaa. Tämän jälkeen esitetään käsiteltävät tuotannon ohjauskohteet ja tarkastellaan niiden soveltuvuutta aurinkopaneelien ylituotannon ohjauksen kohteeksi. Lopussa tuodaan esille käytännön hankkeiden tuloksia releellä tapahtuvasta aurinkosähkön ohjauksesta ja luodaan tulosten pohjalta yhteenveto aurinkopaneelien ylituotannon ohjauksesta. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa tuloksia aurinkopaneelijärjestelmien ylituotannon ohjauksen suunnitteluun, sekä tuotannon ohjauskeinojen että kulutuskohteiden soveltuvuuden kannalta.

2 Aurinkopaneelijärjestelmä

Aurinkoenergia on uusiutuva energianlähde, jonka hyödyntäminen ei tuota paikallisesti päästöjä. Aurinkopaneelijärjestelmän toiminta on omavaraista, eikä se normaalisti vaadi asennuksen jälkeen omistajalta toimenpiteitä tuotannon takaamiseksi. Asennuksen jälkeen aurinkovoimala tuottaa energiaa omatoimisesti jopa yli 30 vuoden ajan. Monien alan yritysten tarjoamien aurinkopaneelien suorituskykytakuu takaa jopa 85 %:n tehon 25 vuoden kohdalla. Tämä tarkoittaa sitä, että 25 vuotta vanha aurinkopaneeli tuottaa energiaa vähintään 85 %:n teholla sen alkuperäisestä nimellistehosta. (1, s. 7.)

Kansainvälisen uusiutuvan energian organisaation IRENA:n keräämän aineiston mukaan Suomen aurinkoenergian kapasiteetti on kasvanut kuvan 1 mukaisesti. Vuonna 2019 Suomen aurinkoenergiakapasiteetti oli 215,4 MW ja vuonna 2010 7,0 MW. Aurinkoenergian asennettu kapasiteetti on siis kasvanut vuoden 2010 lukemasta yli 30-kertaiseksi vuoteen 2019 mennessä. (2.)

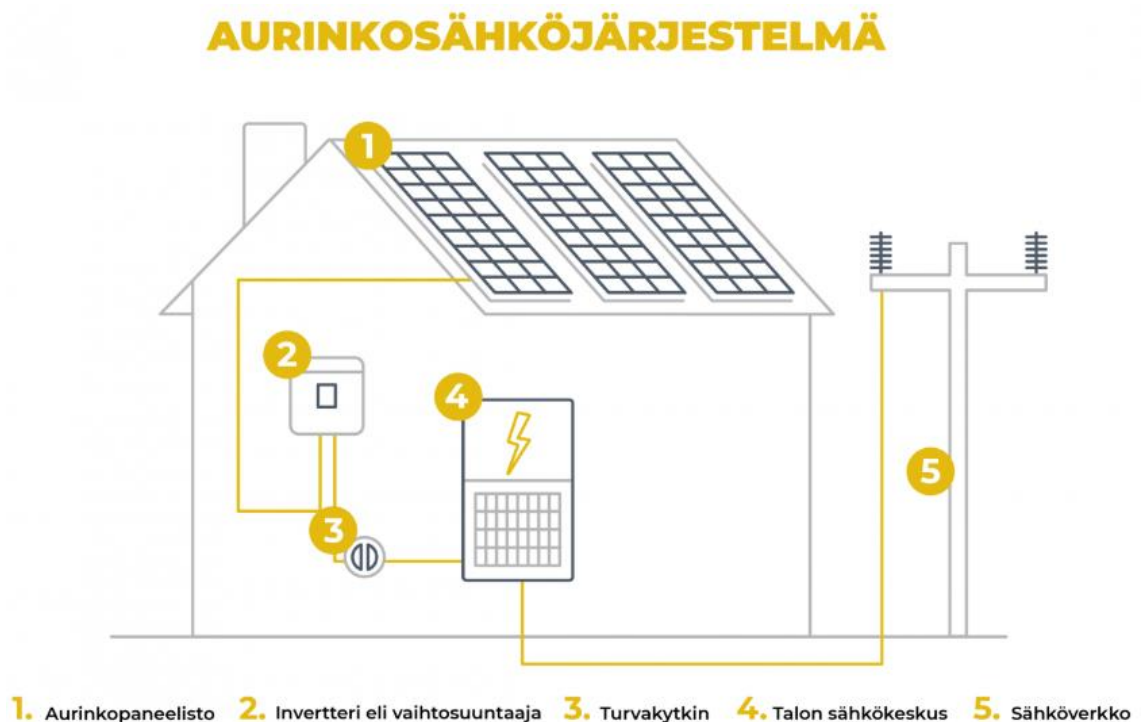


Kuva 1. Suomen aurinkopaneelien tuotantokapasiteetin kasvu (MW) aikavälillä 2010 - 2019 (2).

2.1 Aurinkopaneelijärjestelmän komponentit

Aurinkopaneelijärjestelmät ovat energiaa tuottavina voimalaitoksina verrattain yksinkertaisia komponenteiltaan verrattuna muihin energian tuotantotapoihin, kuten polttomoottoreihin. Koko energian tuotantoprosessi tapahtuu aurinkopaneelien kenoissa ja muut komponentit, kuten vaihtosuuntaajat hoitavat paneelien tuottaman sähkön syötön kuluttajalle. Aurinkopaneelijärjestelmän merkittävin komponentti on aurinkopaneeli ja sen kennot.

Kuvassa 2 näkyy yksinkertaistettu aurinkopaneelijärjestelmän prosessikaavio. Aurinkopaneelit ja vaihtosuuntaaja eli invertteri tuottavat sähköenergiaa kodin sähkökeskukseen, josta aurinkosähkö jakaantuu kodin kaikkiin kolmeen sähkövaiheeseen. Näistä sähkövaiheista aurinkosähkö päättyy kodin kulutuslaitteiden käyttöön. Ylimääräinen aurinkosähkö kulkeutuu sähkömittarin kautta sähköverkkoon, josta maksetaan aurinkosähkön pientuottajalle sähkön pörssihinnan mukainen korvaus. Kuluttajan saama hyvitys sähkön ylituotannon myymisestä verkkoon on huomattavasti pienempi kuin ostosähkön hinta.



Kuva 2. Aurinkosähköjärjestelmän komponentit (3).

Aurinkopaneelijärjestelmä hankintana sisältää yleensä kaikki tarvittavat komponentit kohteeseen, kuten myös aurinkopaneelien asennusta varten tarvittavat kattotelineet. Aurinkopaneelijärjestelmän hinnat ovat vaihtelevia ja täysin riippuvaisia järjestelmän koosta, kohteen tuomista vaatimuksista ja mahdollisten lisäkomponenttien aiheuttamista kustannuksista. Hankinnan hinta kuluttajalle voi olla siis alimmillaan muutamia tuhansia euroja ja kalleimmillaan huomattavasti yli kymmenen tuhatta euroa. Yleisesti ottaen aurinkopaneelijärjestelmien takaisinmaksuajat ovat parhaimmillaan noin kymmenen vuotta ja pisimmillään jopa kaksikymmentä vuotta. Aurinkopaneelihankinnan takaisinmaksuaikaa voidaan kuvata kaavan 1 mukaisesti.

$$\frac{\text{Investoinnin hinta } \text{€}}{\text{Aurinkopaneelien vuosittainen hyöty } \frac{\text{€}}{\text{vuosi}}} = \text{Takaisinmaksuaika (vuotta)} \quad (1)$$

Takaisinmaksuaikaan vaikuttaa erityisesti järjestelmän koko, järjestelmän suunnittelu ja tuotannon hyödyntäminen. Tuotannon hyödyntäminen vaikuttaa takaisinmaksuaikaan, sillä mitä enemmän aurinkopaneelien tuotannosta hyödynnetään kotona, sitä suurempi taloudellinen hyöty investoinnista saadaan. Aurinkopaneelien vuosittaista hyötyä lasiessa täytyy tietää sekä myydyn ylituotannon määrä sekä vältetyn ostosähkön määrä. Erilaisten lisäkomponenttien hankinta järjestelmään luonnollisesti nostaa hankintahintaa sekä hidastaa koko järjestelmän takaisinmaksuaikaa, mikäli lisäkomponentit eivät tehosta aurinkopaneelien tuotannon hyödyntämistä.

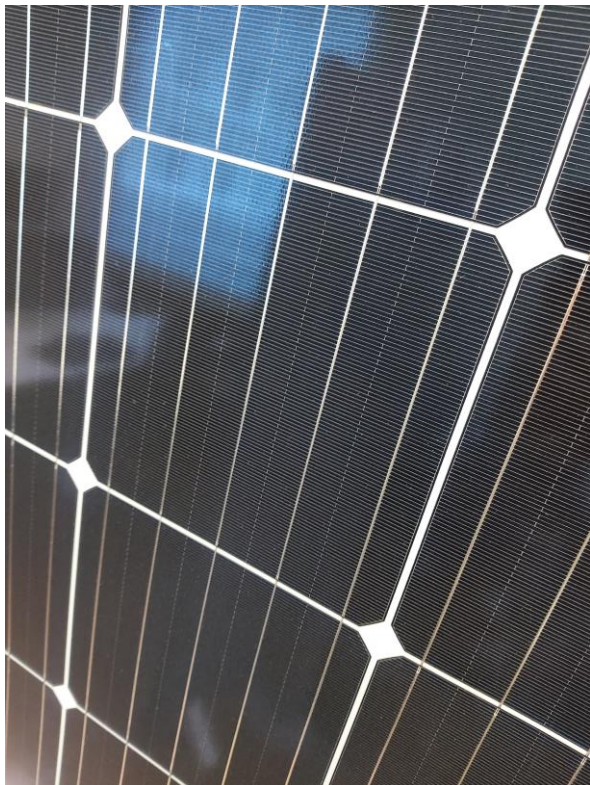
2.1.1 Aurinkopaneeli

Aurinkopaneelit ovat aurinkovoimalan tärkein komponentti, sillä aurinkopaneelien kenoissa tapahtuva valosähköilmiö muuntaa maan päälle tulevan auringon säteilyn sähköenergiaksi. Käytännössä kenoissa tapahtuva valosähköilmiö tarkoittaa elektronien irrottamista puolijohteesta fotonien energian avulla. (4.) Aurinkopaneelit asennetaan yleensä rakennuksen katolle, mutta myös seinäasennukset ja maahan asennukset ovat mahdollisia.

Aurinkopaneeleja on rakenteiltaan ja tehoiltaan erilaisia ratkaisuja. Aurinkopaneeleja on esimerkiksi yksikide- ja monikidepaneeleita, puolikkaan kennon paneeleita ja eri materiaaleista valmistettuja. Eri aurinkopaneelityypeillä voi olla erilaisia ominaisuuksia, kuten

hyötysuhde, varjostuksen vaikutuksen minimointi tai teho. Yleensä aurinkopaneelien nimellistehot sijoittuvat 300 W:n ala- ja yläpuolelle. Nimellisteholla viitataan aurinkopaneelin tehoon, jolla se toimii standardisoiduissa testiolosuhteissa (5, s. 138).

Yksikide- ja monikidepaneelit eroavat toisistaan ulkonäön, valmistusprosessin ja toiminnan osalta. Yksikiteiset paneelit ovat yleensä tummempia tai kokonaan mustia paneeleita (Kuva 3). Monikidepaneelit ovat yleensä sinisiä ja niissä on huomattavissa monikiderakenne, joka näkyy erikokoisina kiteinä kennon pinnassa. Yksikidepaneelit ovat yleensä parempia hyötysuhteeltaan ja valmistusprosessinsa takia hieman kalliimpia. (6.)



Kuva 3. Yksikidepaneeli lähempää tarkasteltuna.

Finnwind Oy on tarkemmin selvittänyt yksikide- ja monikidepaneelien eroavaisuuksia toteuttamalla kaksi samankokoista aurinkovoimalaa. Toinen voimala oli varustettu yksikidepaneeleilla ja toinen voimala monikidepaneeleilla. Viiden vuoden jälkeen yksikidepaneeleista koostuva voimala oli tuottanut 1 - 2 % enemmän kuin monikidepaneeleista koostuva voimala. (6.) Eli vaikka näiden paneelityyppien välillä on eroavaisuuksia, niin

käytännössä toteutuneet tuotantolukemat eivät välttämättä eroa toisistaan huomattavasti.

2.1.2 Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja eli invertteri on laite, joka aurinkopaneelijärjestelmässä muuntaa aurinkopaneelien tuottaman tasasähkön vaihtosähköksi. Suomessa sähköverkon sähkö on vaihtosähköä, minkä takia vaihtosuuntaajaa tarvitaan aurinkopaneelien ja kotitalouden sähköpääkeskuksen väliin. Vaihtosuuntaaja on tärkeässä roolissa aurinkopaneelijärjestelmässä myös tuotannon ohjauksen kannalta, sillä vaihtosuuntaaja syöttää aurinkopaneelien tuotannon käyttöön vaihtosuuntaajan tehon mukaisesti. Vaihtosuuntaajan teho määrittää aurinkopaneeleista saatavan tehon, vaikka aurinkopaneelijärjestelmän nimellisteho olisikin vaihtosuuntaajan tehoa suurempi. Oikean vaihtosuuntaajan mitoittaminen järjestelmään on tärkeää, kuten oikean aurinkopaneelimäärän ja suuntauksen määrittäminen. Myöhemmin työssä tarkasteltavissa oikeissa kohteissa on kuvassa 4 esiintyvä Froniuksen Symo -vaihtosuuntaaja.



Kuva 4. Fronius Symo -vaihtosuuntaaja (7).

Vaihtosuuntaajat tyypillisesti asennetaan joko talon ulkoseinään tai sisälle. Vaihtosuuntaajista yleensä on tarkasteltavissa aurinkopaneelien toimintaan liittyviä lukuja, kuten hetkellinen tuotanto ja vuorokauden aikana tuotettu aurinkosähkö. Joidenkin

vaihtosuuntaajien kohdalla liitettävyys mahdollistaa tuloksien kommunikoinnin pilvipalveluun tai erilaisiin sovelluksiin. Tällaisten liitettävyysratkaisujen avulla aurinkopaneelijärjestelmän toimintaa voi tarkastella sekä älypuhelimella tai tietokoneella, jolloin toimintaa ei tarvitse seurata vaihtosuuntaajan omasta näytöstä.

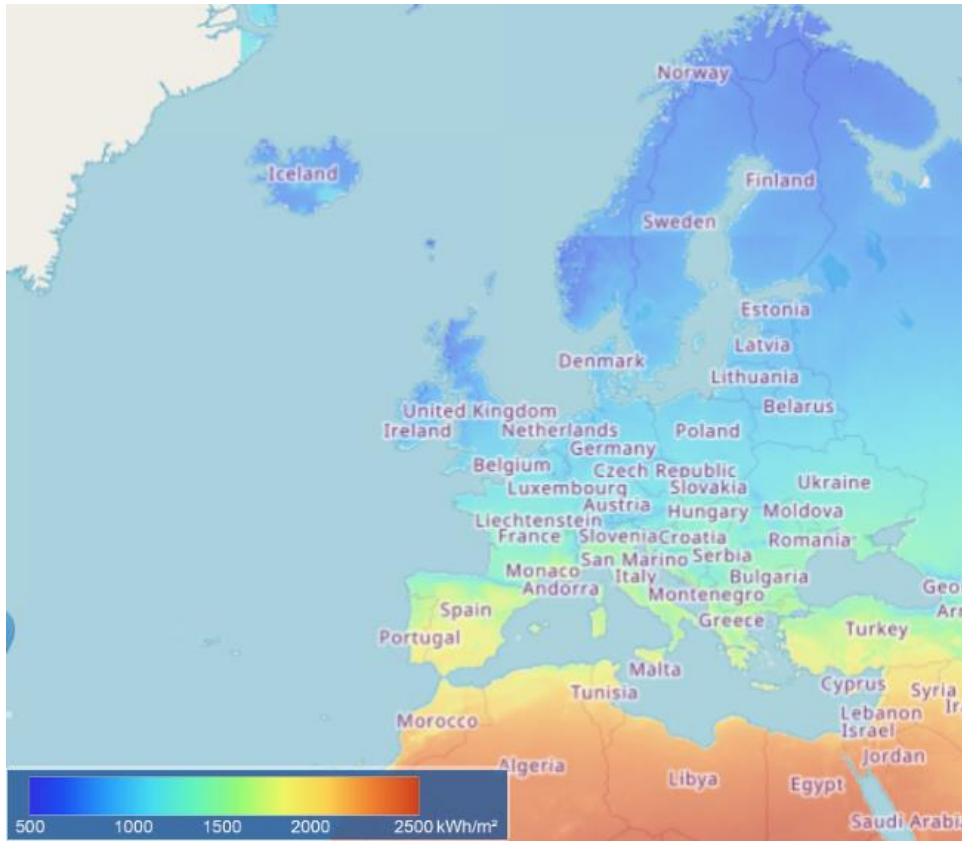
2.1.3 Erotuskytkin

Aurinkopaneelijärjestelmän erotuskytkin on turvallisuustekijöiden takia asennettava manuaalinen kytkin, jolla hätätilanteessa tai tarvittaessa kytketään aurinkosähkön syöttö sähköpääkeskukselle pois. Erotuskytkin siis estää järjestelmän vaihtosuuntaajaa syöttämästä sähkötehoa talon sähköpääkeskukselle. Erotuskytkin tulee asentaa sellaiseen paikkaan, jossa sen luo on helppo ja esteetön pääsy (1, s. 5). Erotuskytkin ei kuitenkaan tee aurinkopaneeleista jännitteettömiä, vaan niiden jännitteettömyys täytyy varmistaa eri keinoin.

2.2 Aurinkopaneelien tuotanto

Suomen sijainti Maan pohjoisella pallonpuoliskolla tarkoittaa pimeitä ja pitkiä talvia, jonka seurauksena aurinkoenergian tuotanto on heikkoa talviaikaan. Suomen kesät ovat kuitenkin aurinkoisia ja valoisia, minkä seurauksena kevästä syksyyn aurinkopaneeleilla on hyvät tuotanto-olosuhteet Suomessa. Etelä-Suomen olosuhteet aurinkoenergian vuotuisen tuotannon osalta ovat verrattavissa Pohjois-Saksaan (8). Energiategollisuuden mukaan maalisi-syyskuun välillä on saatavissa 90 % Etelä-Suomen aurinkoenergiasta (9). Aurinkopaneelien omistaja saakin suurimman hyödyn aurinkopaneelien tuotannosta tuolla aikavälillä. Talvella tapahtuva aurinkopaneelien tuotanto jää pieneksi verrattuna kesän huippulukemiin.

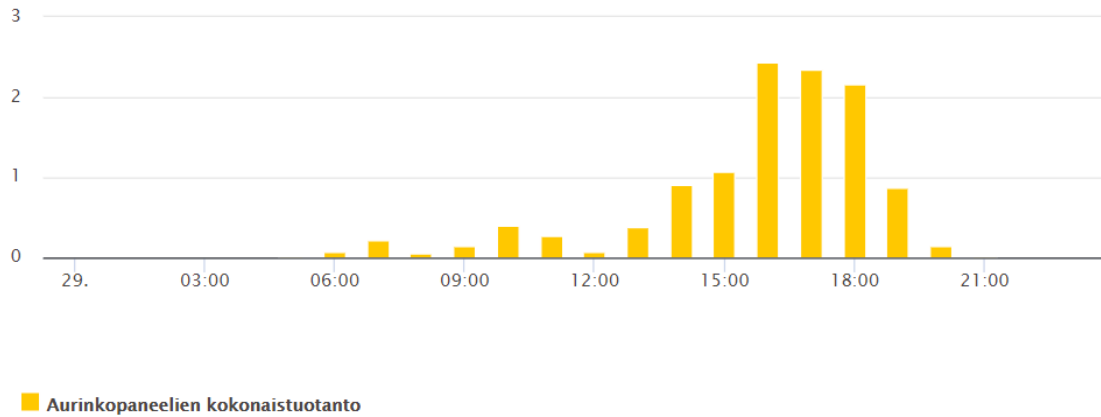
Euroopan komission karttasovelluksesta näkee auringon säteily määrän eri alueilla globaalisti. Kartassa ilmoitettu energiamäärä tarkoittaa määrää, joka alueelle auringosta säteilee neliometriä kohden (Kuva 5). Tämän säteilyn aurinkopaneelien kennot muuttavat sähköenergiaksi, ottaen huomioon paneelien hyötysuhde. Euroopan kohdalla on selvästi nähtävissä auringon säteily määrän kasvu pohjoisesta etelään siirtyessä. Pohjoismaissa säteily määrä on huomattavasti pienempi kuin Espanjan eteläpuolella tai Pohjois-Afrikassa.



Kuva 5. Auringon säteily määrä (kWh) neliometriä kohden Euroopassa (10).

Aurinkopaneelien tuotantoon vaikuttavat maantieteellisten sijaintien ja sääolosuhteiden lisäksi tekninen toteutus. Tuotanto ja aurinkopaneelin kyky toimia erilaisissa olosuhteissa voi vaihdella eri paneelityypeissä ja järjestelmätoteutuksissa. Tehokkaatkin paneelit tuottavat erittäin heikosti aurinkosähköä, jos ne asennetaan väärään paikkaan tai kulmaan. Aurinkopaneelin tuotantokykyä voi huomattavasti heikentää paneelien päälle muodostuva varjo, sillä osittain varjostunut osa paneelista vaikuttaa koko paneelin tuotantoon. Markkinoilla on myös olemassa aurinkopaneeleita, jotka pystyvät tuottamaan normaalia paneelia paremmin mahdollisen varjostuksen aikana.

Kuvassa 6 näkyy oikean aurinkopaneelijärjestelmän toteutunut tuotanto kilowattitunteina vaihtelevan sään päivänä. Puolenpäivän aikainen pilvisyys ja sade huomattavasti heikensivät aurinkopaneelien tuotantoa. Sään kirkastuttua järjestelmän tuotantoteho nousi huomattavasti.



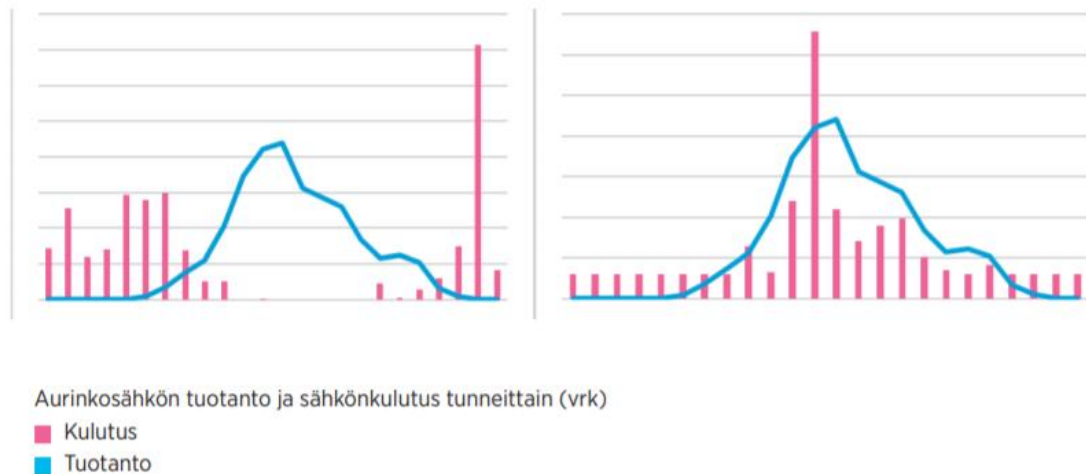
Kuva 6. Aurinkopaneelijärjestelmän toteutunut päivätuotanto sateisena päivänä.

Aurinkopaneelien tuotannolle on tärkeää, että aurinkopaneelijärjestelmän suunnittelu toteutetaan asianmukaisesti asiantuntevan ammattilaisen toimesta. Järjestelmän koko ja suuntaus tulee vastata alueen olosuhteita ja vaatimuksia, jotta aurinkoenergia saadaan tehokkaasti hyödynnettyä.

3 Aurinkopaneelien tuotannon ohjaus

Aurinkopaneelijärjestelmät tulevat tulevaisuudessa entistä kannattavammiksi investoinneiksi, jolloin järjestelmien lukumäärän kasvaessa, lisääntyy myös vaihtelevan ylituotannon määrä. Älykäs ylituotannon ohjaus voi tasata vaihtelevasta tuotannosta seuraavia suuria kulutus- ja tuotantopiikkejä. Esimerkiksi jos halutaan ladata sähköautoon energiaa seuraavan päivän ajomatkaa varten, niin illalla tapahtuessa täydellä latausteholla kuormitus voisi olla tuntia kohden jopa 10 - 20 kW. Sen sijaan, että lataus hoidettaisiin suurella teholla aurinkopaneelien tuotantotuntien ulkopuolella, ladataan sähköauto pienemmällä latausteholla aurinkosähkön tuotannon aikana. Vastaavaa periaatetta voidaan soveltaa opinnäytetyössä esiintyvien muidenkin kuormanohjauskohteiden kohdalla. Sähköauton kohdalla kuitenkin tällainen ratkaisu voi olla haastava toteuttaa, jos sähköauto on käytössä aurinkopaneelien tuotannon aikana. Muut tarkasteltavat kulutuskohteet ovat kuitenkin kiinteitä, eli ne on asennettu kotitalouteen ja sen sähköpääkeskukseen. Kulutuskohteiden tarkempaan tarkasteluun palataan opinnäytetyön neljännessä luvussa.

Kuvassa 7 näkyy vasemmalla havainnollistettuna aurinkopaneelijärjestelmän omistavan kotitalouden tuotanto- ja kulutuslukemat ilman aurinkopaneelien tuotannon ohjausta. Oikealla näkyy esimerkkinä samat lukemat, jos ohjataan kulutusta aurinkopaneelien ylituotannon ajoille. Kuvasta näkee huomattavan eron, sillä yhä suurempi osa kulutuksesta on katettu aurinkopaneelien tuotannolla. Ylituotantoa syntyy silti, mutta sen osuus kokonaistuotannosta on huomattavasti pienempi.



Kuva 7. Aurinkopaneelien tuotanto- ja kulutuslukemat havainnollistaen kuormanohjauksen vaikutukset (1, s. 9).

Täydellinen oman tuotannon hyödyntäminen edellyttäisi energian varastointia, joko fyysisen sähkövaraston muodossa tai markkinoilla joidenkin sähköyhtiöiden tarjoaman ylituotannon hyvityslaskutusmallin muodossa. Ilman energian varastoinnin mahdollisuutta, voidaan siirtää tiettyjen kulutuslaitteiden toiminta-ajat ja tehon tarve aurinkopaneelien tuotannon ajoille. Näin vähennetään sähköverkkoon myytävää ylituotantoa ja myöhemmin verkosta ostettavaa sähköä. Tällöin kotitalouden energiaomavaraisuus paranee ja aurinkopaneelijärjestelmän takaisinmaksuaika pienenee, sillä yhä suurempi osa kotitalouden energiantarpeesta pystytään kattamaan aurinkosähköllä.

Aurinkopaneelien tuotannon ohjausta voidaan toteuttaa useammalla ratkaisulla. Aurinkopaneelien ylituotantoa voidaan ohjata haluttuun kulutuskohteeseen erilaisilla ohjauskomponenteilla, joiden toiminta ja tekniikka avataan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa. Yksinkertaisimmillaan ilman lisäkomponenttien hankintaa kuormanohjausta voidaan toteuttaa käyttämällä sähköä kuluttavia kodinkoneita päiväsaikaan, jolloin

aurinkopaneelien tuotanto on parhaimmillaan. Jos kuluttaja haluaa maksimoida aurinkosähköllä tapahtuvan sähkönkulutuksen, niin kulutuskäyttäytymistä muuttamalla voi myös parantaa omaa energiaomavaraisuutta ilman lisäkustannuksia. Yksinkertaisimmillaan kuluttaja voi pohtia, saunooko esimerkiksi viikonloppuna illalla kahdeksalta vai aikaisemmin, kun aurinkopaneelilta tulee riittävästi ylituotantoa. Tällaiset yksinkertaiset muutokset kulutuskäyttäytymisessä voivat edesauttaa oman aurinkopaneelijärjestelmän ylituotannon hyödyntämistä, jolloin energiaomavaraisuutta saataisiin parannettua ja sähkölaskua pienennettyä. Seuraavaksi tarkastellaan, minkälaisilla ohjauskomponenteilla ja -ratkaisuilla aurinkopaneelien ylituotanto ja kotitalouden kulutus voitaisiin sovittaa yhteen.

3.1 Sähkömekaaninen rele

Releellä tarkoitetaan sähkömekaanista kytkintä, joka kytkee laitteen tai piirin päälle sähkömagneettisen voiman avulla. Käytännössä rele kytkeytyy päälle, kun riittävä sähkömagneettinen voima kytkee sen päälle, jolloin piiri joko sulkeutuu tai aukeaa. (11.) Releelle voidaan asettaa tietyt raja-arvot, milloin se kytkee tietyn laitteen päälle ja pois päältä. Releellä voidaan määrittää halutut tehoalueet esimerkiksi lämminvesivaraajan sähkövastukselle. Rele ohjaa lämminvesivaraajan vastuksen päälle aurinkopaneelien ylituotannon tehon ollessa 2 kW tai muu haluttu tehon arvo. Kun releelle riittävää ylituotantoa ei tapahdu, aurinkosähkö virtaa normaaliin tapaan järjestelmän vaihtosuuntaajalta kodin kulutukseen tai sähköverkkoon.

Releratkaisun tuoma hyöty ylituotannon ohjaukseen on sen yksinkertaisuus ja hankintahinta. Se reagoi aurinkopaneelien ylituotantoon juuri halutuilla tehoalueilla, jolloin tiedetään esimerkiksi lämminvesivaraajan toimivan päiväsaikaan aurinkopaneelien ylituotannolla. Joissakin vaihtosuuntaajissa voi olla sisäänrakennettu rele, jolloin ohjaukselle olennaiset arvot voidaan määrittää vaihtosuuntaajasta. Opinnäytetyön kuudennessa luvussa käsitellään käytännön hankkeiden tuloksia, joissa releellä on ohjattu aurinkopaneelien ylituotantoa sähkökäyttöisen lämminvesivaraajan veden lämmitykseen. Rele on mahdollista asentaa kotitalouden sähköpääkeskukseen fyysisenä komponenttina, kuten kuudennessa luvussa tarkasteltavissa kohteissa toteutettiin.

3.2 Kellokytkin

Kellokytkin on yksinkertainen tapa saada kulutuskohteet päälle samaan aikaan kuin aurinkopaneelijärjestelmä tuottaa ylimääräistä sähköä. Käytännössä tämä ratkaisu kytkee ajastimen avulla laitteet päälle tiettyyn kellonaikaan. Ratkaisun idea perustuu siihen, että tiedetään ylituotannon kellonajat ja ohjataan kellokytkimellä kulutus alkamaan samaan aikaan. Kellokytkimen hyvä puoli on sen hinta, sillä se ei ratkaisuna ole kovin kallis. Kellokytkimiä käytetään useissa ajastusta vaativissa ratkaisuissa, kuten ulkovalaistuksessa. Ongelmana on se, että yksinkertainen kellokytkin kytkee laitteen päälle aina sille määrättyyn aikaan, vaikka ylituotantoa ei tapahtuisi. Sateisena päivänä kellokytkimellä toimiva järjestelmä ei tiedä, että aurinkopaneelit eivät tuota energiaa ja laitteet kytkeytyisivät päälle turhaan. Tällöin laitteet toimisivat normaaliin tapaan verkosta ostettavalla sähköllä. Kellokytkimen vahvuus ohjauksessa perustuu sen alhaiseen hankintahintaan ja yksinkertaisuuteen, sillä liian monimutkaiset ja kalliit ohjausjärjestelmät voivat olla alttiita vioille ja nostaa aurinkopaneelijärjestelmän investoinnin hintaa. Kellokytkimen heikkous verrattuna releeseen on se, että rele huomioi todellisen ylituotannon ja kytkeytyy pois päältä ylituotannon loppuessa. Yksinkertainen kellokytkin ei pysty tällaiseen kommunikointiin vaihtosuuntaajan kanssa, vaan toimii sille asetettujen kellonaikojen mukaan.

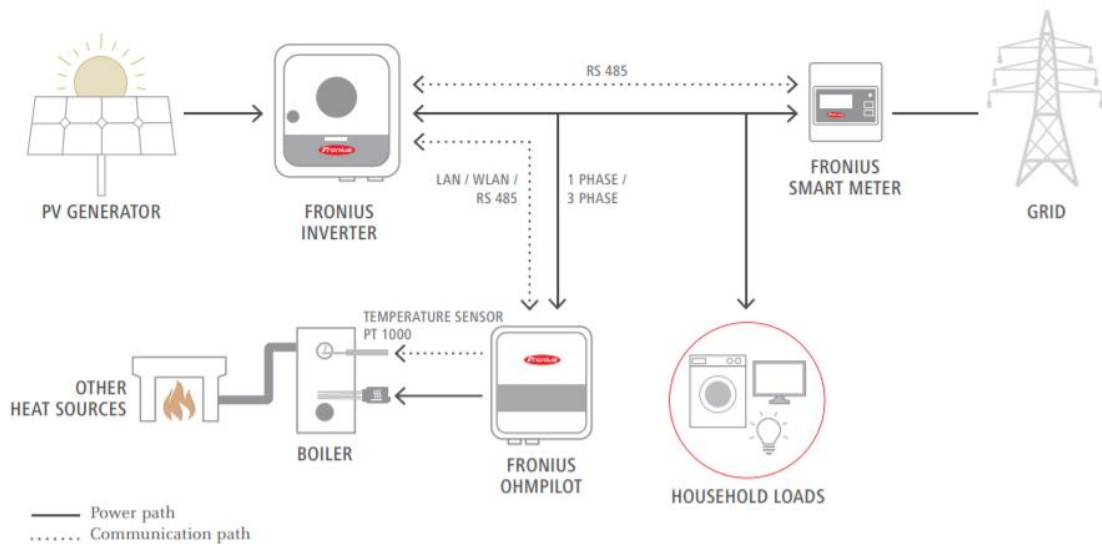
3.3 Älykäs ohjaus

Sähkömekaaninen rele ja kellokytkin ovat yksinkertaisia ohjausratkaisuja, joilla voidaan osittain vastata aurinkopaneelien ylituotannon aiheuttamiin ongelmiin. Näissä ratkaisuissa voi olla käytännön ongelma toteuttamisen suhteen, sillä ne kytkeytyvät joko päälle tai pois päältä. Niillä voidaan kuitenkin saavuttaa merkittäviä hyötyjä aurinkosähkön ohjauksessa, sillä yleisinä komponentteina ne ovat toimintavarmoja ja yksinkertaisia.

Älykkäällä ohjauksella voitaisiin seurata aurinkopaneelien ylituotantoa ja sen muutoksia, jolloin kulutus tapahtuisi ylituotannon lukemien mukaan. Tuotannon ohjaus tällöin seuraisi ylituotantoa reaaliaikaisesti ja muuttaisi tehoa sen mukaan. Jos älykäs ohjaus huomioi ylituotannon ajat ja määrän, niin se pystyy mukauttamaan kulutuslaitteen tehon tämän mukaisesti. Tämän tyylinen älykäs ylituotannon ohjaus kulutukseen vaatii jatkuvaa laitteiden välistä kommunikointia, jotta laitteen säädetty teho vastaa ylituotantoa.

3.3.1 Fronius Ohmpilot -ohjauslaite

Fronius vaihtosuuntaajien valmistajana tarjoaa tuotannon ohjausratkaisuja sekä osana vaihtosuuntaajien toimintaa että erillisinä komponentteina. Esimerkiksi Fronius Ohmpilot, joka on vaihtosuuntaajaan kytkettävä ohjauslaite. Kuvassa 8 esitetään Fronius Ohmpilot kytkettynä aurinkopaneelijärjestelmään. Ohmpilot ohjaa aurinkopaneelien ylituotantoa lämminvesivaraajan sähkövastukselle tai lämpöpumpulle. Prosessikaaviossa esiintyvä Smart Meter tarkoittaa energiamittaria, joka mittaa energiankulutuksen kotitaloudessa. Ylituotantoa täytyy mitata, jotta ohjauslaitteet, kuten Ohmpilot pystyvät ohjaamaan ylituotantoa haluttuun kohteeseen.



Kuva 8. Fronius Ohmpilot osana aurinkopaneelijärjestelmää (12).

Fronius Ohmpilot liitetään osaksi aurinkopaneelijärjestelmää ja on ratkaisuna hyvin samanlainen kuin opinnäytetyössä esitetyt muutkin kuormanohjausratkaisut. Fronius Ohmpilot toimii järjestelmän vaihtosuuntaajan ja lämminvesivaraajan välillä.

3.3.2 Sähköauton latauslaitteet

Sähköauton latauksen ja aurinkopaneelien ylituotannon yhdistäminen voi olla mahdollista tietyillä sähköauton latauslaitteilla. Perinteisesti sähköauton latauslaitteisiin kuuluu yksinkertaisimmillaan toiminto sähköauton lataamisesta verkkosähköllä tietyllä teholla.

Markkinoille on ilmestynyt kuitenkin latauslaitteita, joiden toimintaan pystyy integroimaan aurinkopaneelien ylituotannon hyödyntämisen latausprosessissa. Tällaiset latauslaitteet pystyvät esimerkiksi energiamittarin avulla säätämään lataustehoaan aurinkopaneelien ylituotannon mukaiseksi. Ratkaisusta ja laitteista riippuen sähköauton latauksen yhdistäminen aurinkosähkön tuotantoon voi vaatia erilaisia lisälaitteita, kuten mittareita tai moduuleita. Tällaiset lisälaitteet yleensä nostavat latauslaitteen hankintahintaa.

Kuvassa 9 esiintyvä Myenergi Zappi on yksi markkinoilla olevista sähköauton latauslaitteista, joissa on mahdollisuus hyödyntää aurinkopaneelien ylituotantoa sähköauton lataukseen. Käytännössä latauslaite mittaa pihtivirtamittareilla aurinkopaneelien tuotantoa ja kodin kulutusta (13, s. 33). Näillä lukemilla se osaa säätää latauslaitteen lataustehon vastaamaan aurinkopaneelien ylituotantoa. Kuvassa 9 näkyy latauslaitteen latauspistoke harmaan kannen alta. Kannen alla olevaan Type 2 -latauspistokkeeseen kytketään sähköauto sen omalla latauskaapelilla. Type 2 on yleinen standardisoitu latauspistoketyyppi, joka on vakiintunut vakiotyypiksi useimpiin sähköautoihin.



Kuva 9. Myenergi Zappi -latauslaite (14).

Huomattava ero mainitussa sähköauton latauslaitteessa esimerkiksi aiemmin mainittuun releeseen tai kellokytkimeen on laitteen kyky mitata reaaliaikaista ylituotantoa ja mukauttaa laitteen teho sen muutoksiin. Jos lataukseen on valittu pelkästään aurinkopaneelien tuotannon hyödyntäminen ja tuotanto syystä tai toisesta lakkaisi, niin latauslaite myös

lopettaisi sähköauton latauksen. Lataus jatkuisi vasta, kunnes riittävästi ylituotantoa on saatavilla. (13, s. 11.)

3.4 Energiaomavaraisuuden parantaminen

Opinnäytetyössä kartoitettavalla energiaomavaraisuuden parantamisella tarkoitetaan keinoja, joilla saadaan maksimoitua kuluttajan oman aurinkosähkön hyödyntäminen. Eli vähennetään sähköverkkoon myytävän aurinkosähkön määrää erilaisilla teknisillä ratkaisuilla. Kuluttajalle energiaomavaraisuuden parantaminen tarkoittaa tehostunutta aurinkopaneelijärjestelmän takaisinmaksuaikaa, pienempiä kotitalouden sähkön kulutuksen päästöjä ja vähentyntä ostosähkön määrää. Kuluttajalle energiaomavaraisuuden parantaminen on kustannustehokkaampaa kuin ylituotannon myyminen sähköverkkoon, sillä kuluttaja maksaa ostosähköstä enemmän kuin saa oman aurinkosähkonsä myymisestä.

Kuvasta 10 näkee, miksi pientuottajan tulisi pyrkiä maksimoimaan oman järjestelmän tuotannon hyödyntäminen ylituotannon myymisen sijasta. Itse sähköenergian hinta on vain yksi osa verkosta ostettavan sähkön kokonaishintaa, sillä kokonaishintaa nostavat myös verot ja siirto. Pientuottajan myydessä omaa ylituotantoansa sähköverkkoon, hän saa korvauksen vain myymänsä sähköenergian osuudesta. Oman ylituotannon myyminen edellyttää kuitenkin sopimusta pientuotantoa ostavan sähköyhtiön kanssa (15).



Kuva 10. Vertaileva kuva ostosähkön ja oman tuotannon hinnoittelun eroista (16).

Energiaomavaraisuuden parantamiseen voitaisiin myös vaikuttaa sähköpääkeskuksen tasolla huomioimalla eri sähkövaiheiden väliset kulutus- ja tuotantolukemat. Suomessa jokaisen kodin sähkökeskuksessa on kolme eri sähkövaihetta, josta sähköenergiaa jaetaan kodin kulutuskohteisiin. Eri kulutuskohteet on kytketty joko vain yhteen vaiheeseen tai kaikkiin kolmeen vaiheeseen, kuten esimerkiksi sähköauton latauslaite. Sähköauton kotilatauslaite voi olla joko yhteen tai kolmeen vaiheeseen kytkettävä, usein riippuen halutusta lataustehosta ja laitteen valmistajasta. Jokaiseen sähkövaiheeseen jakautuu aurinkopaneelijärjestelmän sähkön tuotanto tasaisesti, jos aurinkopaneelijärjestelmä on kytketty kolmeen vaiheeseen. Aurinkopaneelien tuotanto ei jakaudu tasaisesti kulutuksen mukaan, jos yhdessä vaiheessa on vähemmän kulutusta ja toisessa enemmän. (1, s. 10.) Kuluttajalle tällainen tuotannon hyödyntäminen ei ole optimaalinen, sillä kaikkea aurinkopaneelien tehopotentiaalia ei tule aina hyödynnettyä.

4 Kuormanohjauskohteet

Kuormanohjauskohteiksi valikoituivat erilaiset kodin sähköpääkeskukseen liitetyt laitteet, joiden kulutus on huomattava tai ne muuten soveltuisivat tuotannon ohjauksen kohteeksi. Suuren tehontarpeen lisäksi oli tärkeää, että kulutuskohteiden tehontarve voitaisiin sovittaa aurinkopaneelien ylituotannon kanssa yhteen. Lämminvesivaraajaan voidaan päiväsaikaan ohjata aurinkopaneelien ylituotantoa varastoiden energiaa lämpimän veden muodossa illalla tapahtuvaa käyttöveden kulutusta varten. Onnistuneella kuormanohjauksella saadaan hyödynnettyä aurinkopaneelien tuotantoa tehokkaammin, mutta myös vältetään suuria kulutuspiikkejä sähköverkkoon, eli äkillisiä ja suuria tehontarpeita. Esimerkiksi sähköauton lataus suurella teholla voi olla merkittävä kulutuspiikki, jopa 10 - 20 kW. Tällainen tehontarve on suuri lukema kotitalouden sähkön kulutuksessa. Tuotannon ja kulutuksen ohjauksella voidaan pyrkiä tasapainottamaan tällaiset suuret kulutuspiikit jakamalla ne pidemmälle aikavälille tai sovittamalla ne yhteen aurinkopaneelien ylituotannon kanssa.

Kuormanohjauskohteista tarkempaan tarkasteluun valikoitui lämminvesivaraaja, sillä opinnäytetyöaiheen toimeksiantaja Helen Oy:n kautta oli saatavilla aiheeseen liittyviä mittaustuloksia. Näitä mittaustuloksia tullaan tarkemmin tarkastelemaan opinnäytetyön kuudennessa luvussa. Muiden tuotannon ohjauskohteiden kohdalla oli arvioitava soveltuvuus ja saavutettavat hyödyt aurinkopaneelien tuotannon ohjauksessa.

4.1 Lämminvesivaraaja

Lämminvesivaraaja valikoitui opinnäytetyössä tarkemman tarkastelun kohteeksi, sillä saatavilla olevien mittaustulosten lisäksi se on yleinen ratkaisu suomalaisten kodeissa ja lämminvesivaraajan vettä on mahdollista lämmittää etukäteen aurinkopaneelien ylituotannon aikaan. Näin ylimääräinen energia siirretään lämpöenergiana lämminvesivaraajan veteen ennen jo varsinaista käyttötarvetta. Kyseessä on käytännössä energian varastointia lämpimän veden muodossa, sillä varaaja pystyy varastoimaan lämpöenergiaa vedessä myöhempää käyttöä varten. Vesi on sopiva väliaine lämpöenergian varastointiin, sillä vedellä on hyvä lämmönvarastointikyky. Aurinkosähkön varastoimista lämpimän veden muodossa voidaan hahmottaa seuraavalla kaavalla (Kaava 2), jolla voidaan laskea tarvittava energiamäärä tietyn vesimassan lämpötilan nostoon (17).

$$Q = cm\Delta T \quad (2)$$

Kaavassa 2, c tarkoittaa veden ominaislämpökapasiteettia ja m veden massaa kilogrammoina. ΔT viittaa lämpötilan muutokseen, eli lämmityksen jälkeinen lämpötila vähennettynä alkutilanteen lämpötila. (17.) Havainnollistetaan energiantarvetta seuraavaksi tilanteessa (Kaava 3), jossa täytyy lämmittää 300 litraa vettä 55 °C:sta 70 °C:seen. Oletetaan, että 300 litraa vettä painaa 300 kilogrammaa. Veden ominaislämpökapasiteettina käytetään 4,2 kJ/kg°C (5, s. 106).

$$Q = 4,2 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}^\circ\text{C}} \times 300 \text{ kg} \times (70^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) = 18\,900 \text{ kJ} \quad (3)$$

18 900 kJ eli 18,9 MJ on 5,25 kWh, sillä 1 kWh on 3,6 MJ (18). Noin 5,25 kWh energiaa tarvitaan siis kyseiseen lämpötilan nostoon tyypillisellä lämminvesivaraajan tilavuudella (300 litraa). Kyseinen energiamäärä on tyypillisellä aurinkopaneelijärjestelmällä verrattain helposti saavutettava energiantuotantolukema päivässä. Ratkaisun tarkoitus on vähentää illalla ostettavan sähkön määrää, sillä illalla varaajassa on jo lämpöä varastoituna käyttöä varten. Tällöin kuluttajan lämmin käyttövesi olisi aurinkosähköllä lämmitetty, eikä olisi tarvetta erikseen käyttää yhtä suurta energiamäärää veden lämmittämiseen illalla. Toimiessaan ratkaisu teoriassa vähentäisi lämpimästä käyttövedestä ja mahdollisesti vesikiertoisesta lämmityksestä koituvia kustannuksia. Aurinkopaneelien ylituotannon ohjausta lämminvesivaraajaan tai muuhun käyttövettä lämmittävään kohteeseen on syytä

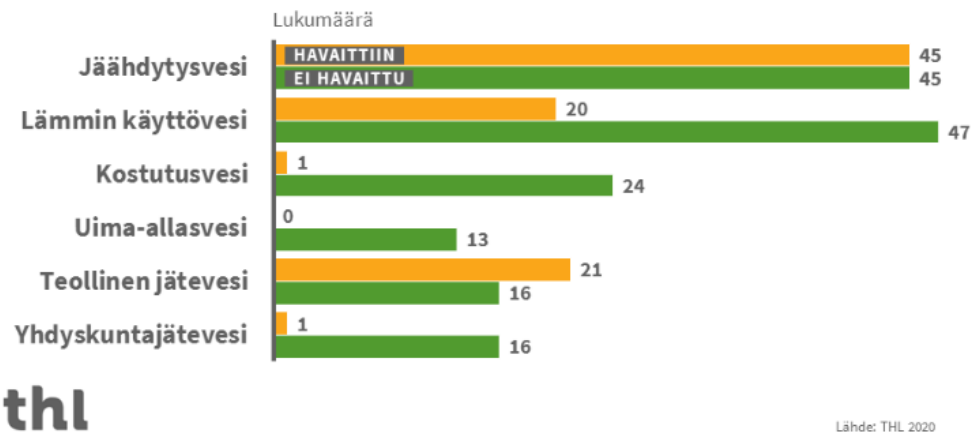
tarkastella, sillä lämmin käyttövesi vastaa jopa 15 %:a kotitalouden energiankulutuksesta (19).

Lämminvesivaraajien tilavuudet ja sähkövastuksien tehot vaihtelevat valmistaja- ja mallikohtaisesti, eikä tiettyä yleistä standardisoitua ratkaisua ole. Lämminvesivaraajien sähkövastusten tehovaatimukset eivät kuitenkaan ole liian suuria aurinkopaneelien ylituotannolle, sillä kesäisin aurinkopaneelijärjestelmä voi tuottaa useita kilowattitunteja ylimääräistä aurinkosähköä, parhaimmillaan jopa kymmeniä kilowattitunteja. Lämminvesivaraajan ja aurinkopaneelien ylituotannon yhdistämistä tarkastellaan opinnäytetyön myöhemmissä luvuissa laskutoimitusten ja käytännön hankkeen tulosten avulla. Näiden pohjalta muodostetaan kattavampi johtopäätös aurinkopaneelien ylituotannon ja lämminvesivaraajan yhdistämisestä.

Lämminvesivaraajan kohdalla tulee myös huomioida järjestelmän vaatimukset veden lämpötilan suhteen, johtuen legionellabakteerien aiheuttamasta riskistä. Legionellabakteerit voivat aiheuttaa hengitysteihin päästessään sairastumisia. Legionellabakteerien kohdalla voidaan estää bakteerien muodostuminen lämminvesivaraajassa pitämällä veden lämpötila tarpeeksi korkealla. Legionellabakteerien kohdalla lämpötila tulisi nostaa vähintään 55 °C:seen, jonka alapuolelle lämminvesivaraajan veden lämpötila ei tulisi pudota. (20.)

Terveystieteiden tutkimuslaitoksen julkaisemasta aineistosta näkee, että legionellabakteerien esiintyminen lämpimässä käyttövedessä on hyvin mahdollista, sillä havaittuja tapauksia vuosina 1988 - 2008 oli aineiston mukaan 20 kappaletta (Kuva 11).

Legionellojen esiintyminen vesijärjestelmissä 1988–2008



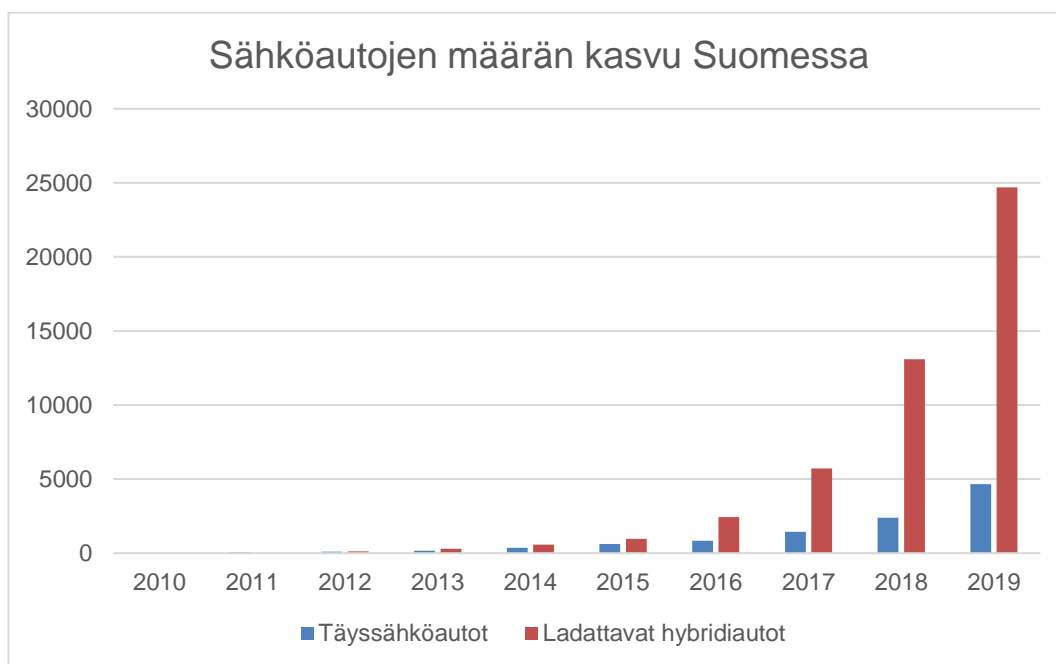
Kuva 11. Legionellabakteerien esiintyminen erilaisissa vedenkäyttöjärjestelmissä (20).

Lämminvesivaraajassa legionellabakteerien muodostuminen on mahdollista, jos varaa-
jan veden lämpötila laskee alle 55 °C:n. Tilanteissa, joissa lämminvesivaraajalle ei tule
ylituotantoa aurinkopaneeleilta, lämminvesivaraajan pitää lämmitellä verkkosähköllä
vettä ylläpitääkseen minimilämpötilan. Tästä on varmistuttava tapauskohtaisesti, jotta le-
gionellabakteerien riski ei kasva aurinkosähköhjauksen takia.

4.2 Sähköauton lataus

Sähköautojen määrä on kasvanut Suomessa huomattavaa vauhtia sekä ladattavien hyb-
ridiautojen (PHEV) että täyssähköjen (BEV) osalta, vaikkakin niiden osuus ajoneuvokan-
nasta on vielä pieni. Täyssähköautot ja ladattavat hybridit molemmat ovat ladattavia ajo-
neuvoja, mutta niiden voimalinjassa on teknisiä eroavaisuuksia. Täyssähköauto liikkuu
pelkästään sähkömoottorin ja akustoon varastoidun sähköenergian avulla, kun taas la-
dattavassa hybridissä sähköinen voimalinja on pienempi ja yhdistettynä polttomoottoriin.
Ladattavassa hybridissä yhdistyy siis kaksi voimalinjaa yhden sijasta. Molemmat luoki-
tellaan sähköautoiksi, mutta ne erotellaan tekniikkansa pohjalta toisistaan. Tilastokes-
kuksen mukaan täyssähköautojen määrä kasvoi vuonna 2019 edellisvuodesta 93 % ja
ladattavien hybridien määrä 89 %. (21.)

Kuvasta 12 näkee, että vuosina 2010 - 2019 on tapahtunut huomattava kasvu sähköautojen määrässä Suomessa. Sekä aurinkosähköjärjestelmien että ladattavien sähköautojen suosion kasvu on merkittävää, joten aurinkopaneelien ylituotannon ohjauksen yhdistämistä sähköautojen lataukseen on syytä kartoittaa. Tulevaisuudessa näiden tekniikoiden kehittyminen yleisiksi ratkaisuksiksi kuluttajapuolella todennäköisesti kasvattaa kiinnostusta älykkääseen tuotannon ohjaukseen.



Kuva 12. Sähköautojen määrän vuosittainen kasvu Suomessa (22).

Henkilöautojen energian saanti ei sähköautoissa tapahdu perinteiseen tapaan polttoainetta jakelevalta asemalta, vaan autojen energian saannin painopiste siirtyy enemmän autoilijan kotitalouteen, työpaikalle tai julkisiin latauspisteisiin, kuten kauppakeskuksiin. Sähköautoilijan on mahdollista ladata sähköautoaan kotona joko kiinteän sähköautojen latauslaitteen avulla tai perinteisestä kotitalouspistorasiasta. Kotitalouspistorasiasta ei suositella sähköautojen latausta yli kahdeksan ampeerin virralla turvallisuussyistä vaikkakin se on teknillisesti mahdollista tietyillä latureilla (23, s. 2). Sähköautojen lataustehot riippuvat aina latauslaitteesta, sähköauton sisäisestä laturista ja siitä, kuinka nopeasti halutaan sähköautoa ladata. Sähköautojen kotilatauslaitteiden lataustehot voivat ylittää jopa 20 kW:iin, vaikkakin yleensä sähköauton laturin teho on huomattavasti pienempi.

20 kW voi olla myös liian suuri teho kotitalouden sähköpääkeskukselle, jolloin sähköautoa voidaan joutua lataamaan pienemmillä tehoilla.

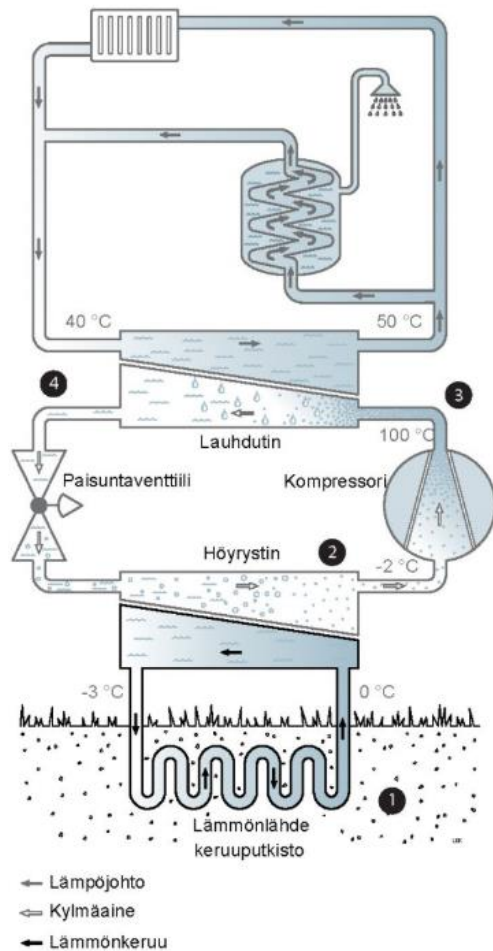
Aurinkopaneelien ylituotannon ohjaus sähköauton lataukseen on autoilun päästöjen kannalta ympäristöystävällinen ratkaisu, sillä tällöin sähköauton käyttämä energia on uusiutuvalla energiantuotantotavalla tuotettu ja sähköautoilun päästöt laskevat entisestään. Aurinkopaneelien tuotannon ja sähköauton lataamisen yhteensovittamisessa voi olla kuluttajakäyttäytymisen takia ongelma, sillä aurinkopaneelien tuotanto ajoittuu päiväsaikaan ja sähköauton lataus mahdollisesti yöaikaan. Tällöin voi olla vaikeaa yhteensovittaa aurinkopaneeleita ja sähköauton lataamista. On kuitenkin syytä kartoittaa tarkemmin sähköauton latauksen yhdistämistä aurinkopaneelien tuotantoon, sillä ratkaisuna se vähentäisi kuluttajan autoilun päästöjä ja mahdollisesti tasaisi latauksesta syntyviä korkeita latauspiikkejä. Sähköautojen latauksen tehontarpeet ovat merkittäviä, jolloin pientuotannon ylituotantoa hyödyntämällä voitaisiin mahdollisesti vähentää kotilatauksesta aiheutuvia kustannuksia. Opinnäytetyön myöhemmässä luvussa (5.2) tarkastellaan laskutoimitusten pohjalta aurinkopaneelien ylituotannon yhdistämistä sähköauton lataukseen.

4.3 Maalämpö

Maalämpö on uusiutuva energianlähde ja maalämmöllä on mahdollista toteuttaa rakennuksien lämmön tarve päästöttömästi ja kustannustehokkaasti. Periaatteessa maalämmössä ja muissakin lämpöpumppujärjestelmissä on kyse lämpöenergian siirtämisestä jostain lähteestä toiseen kohteeseen, kuten käyttöveteen tai lämmitysjärjestelmään. Noin 1/3 maalämpöjärjestelmän tuottamasta lämpöenergiasta on peräisin kompressorin käytöstä (24). Osa kylmäaineen puristamiseen käytetystä sähköenergiasta muuttuu mekaanisen työn kautta kompressorissa lämpöenergiaksi.

Kuvassa 13 esitetään maalämpöjärjestelmän toimintaperiaate. Prosessi alkaa kuvan alapäästä, jossa esitetään maan alle asennettua lämmönkeruuputkistoa, jossa kiertää lämpöä itseensä varastoiva neste. Tämä neste kulkee höyrystimeen, jossa se siirtää lämpöenergiaa lämmönvaihtimen läpi matalammassa lämpötilassa olevaan kylmäaineeseen. Kylmäaine höyrystyessään kulkee siihen varastoituneen lämpöenergian kanssa kompressoriin, joka puristaa kaasumaisessa olomuodossa olevan kylmäaineen korkeampaan paineeseen. Kylmäaineen paineen kasvaessa, sen lämpötila nousee myös

huomattavasti ja lauhduttimessa se luovuttaa lämpöenergiansa lämmönvaihtimen läpi kodin lämpimän veden tarpeeseen, kuten vesikiertoiseen patteriverkostoon tai lämpimän käyttöveden tarpeeseen. (25.)



Kuva 13. Maalämpöjärjestelmän toimintaperiaate (26).

Aurinkopaneelien ylituotannolla voitaisiin kattaa osa maalämpöpumppujärjestelmän kompressorin tarvitsemasta sähköenergiasta. Maalämpöpumppu toimii kotitalouden pääsääntöisenä lämmitysratkaisuna ja sen suurin käyttötarve on lämmityskäytössä kylmempien sääolosuhteiden aikana, kuten talvella. Aurinkopaneelien ylituotanto taas ajoittuu pääsääntöisesti kesäkuukausille, jolloin maalämpöjärjestelmän käyttö lämmityksessä jää pienemmäksi. Maalämpöjärjestelmän ja aurinkopaneelien ylituotannon yhdistämistä voi myös tarkastella maaviileän tuottamisessa, jolla käytännössä tarkoitetaan asunnon jäähdyttämistä kuumana päivänä. Maaviileä on mahdollinen

maalämpöjärjestelmään, jos järjestelmän lämmönkeruulähteenä on porakaivo. Tällöin järjestelmä poistaa sisäilmasta lämpöenergiaa ja siirtää sitä porakaivoon, jolloin poistettu lämpöenergia varastoituu porakaivossa talvea varten. (27.) Kesäkuukausina, jolloin jäähdytyksen tarve on kohtalainen ja aurinkopaneelien ylituotanto ajankohtainen, voitaisiin teoriassa kattaa maaviileän energiantarve aurinkosähköllä. Seuraavassa luvussa tarkastellaan jäähdytyksen tarvetta ja kustannuksia tarkemmin.

Maalämpöjärjestelmä tuottaa lämpöä myös käyttöveden tarpeeseen, jolloin teoriassa voitaisiin ohjata ylituotantoa järjestelmän varaajasäiliöön. Kyseessä on hyvin samankaltainen idea, kuin lämminvesivaraajassa. Jos ylituotannon määrä on suuri ja kotitaloudesta löytyy maalämpöjärjestelmä, niin mahdollisesti olisi kannattavaa nostaa järjestelmän lämpimän veden varastoinnin tilavuutta ylimääräisellä vesivaraajalla. Tällöin olisi mahdollista varastoida suurempi määrä lämpöenergiaa lämpimän veden muodossa, jos ylituotantoa olisi huomattavasti liikaa. Ylimääräiset säiliöt kuitenkin nostavat järjestelmän hintaa ja eivät välttämättä ole kustannustehokas tapa varastoida ylimääräistä aurinkosähköä.

4.4 Ilmalämpöpumppu

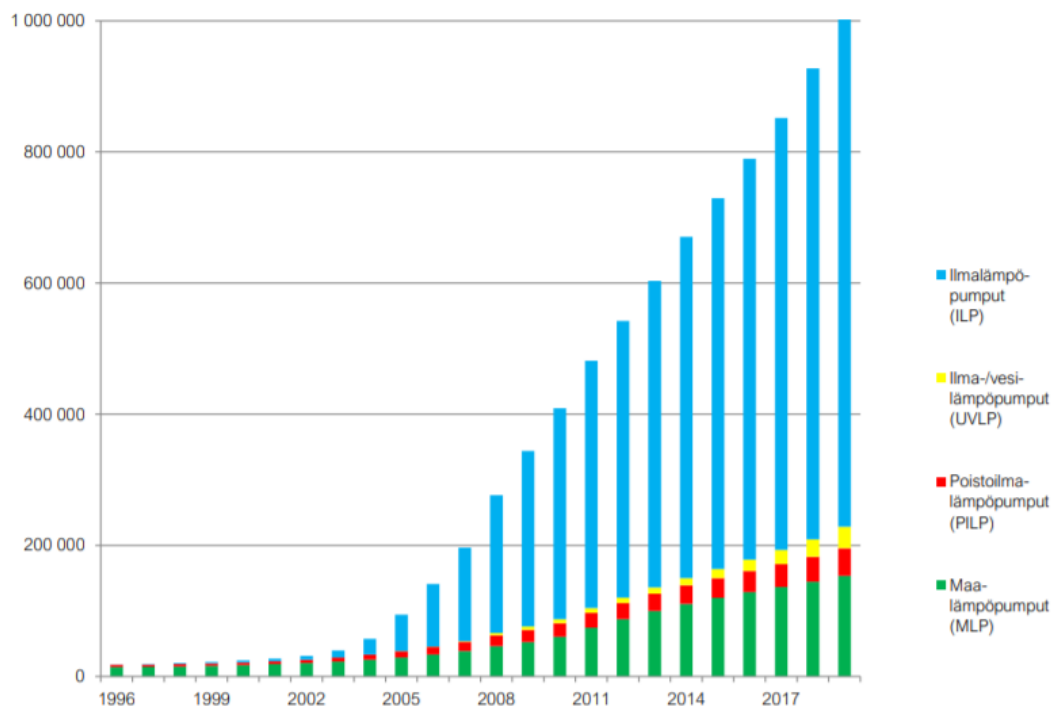
Ilmalämpöpumppu siirtää lämpöenergiaa joko ulos tai sisään ja toimii kotitalouden tukilämmityslähteenä ensisijaisen lämmitystavan ohella. Ilmalämpöpumppu koostuu sisä- ja ulkoyksiköstä. Ilmalämpöpumppu siirtää lämpöenergiaa joko ulos tai siirtää sitä talon sisään. Näin ilmalämpöpumppu toimii sekä talon tukilämmityksessä että jäähdytyksessä. (28.) Päälämmitysmuotoja voivat olla esimerkiksi sähkölämmitys, kaukolämpö tai öljylämmitys. Ilmalämpöpumppu toimiessaan tukilämmityslähteenä vähentää kuitenkin huomattavasti lämmityskuluja ja tuo taloudellista säästöä kotitalouden lämmönkulutukseen. Ilmalämpöpumpulla saatavat säästöt voivat olla jopa satoja euroja, riippuen kodin kulutuksesta (29).

Kuvassa 14 on Toshiba ilmalämpöpumpun sisäyksikkö. Sisäyksikkö asennetaan kotitalouden sisätiloihin, jossa se johtaa ulkoyksiköltä tulevaa lämpöenergiaa sisätiloihin tai käänteisesti viilentää tiloja. Ilmalämpöpumppujen sisäyksiköt asennetaan yleensä korkealle seinään, kuten katonrajaan.



Kuva 14. Toshiba Premium ilmalämpöpumpun sisäyksikkö (30).

Ilmalämpöpumput ovat huomattavasti yleisin lämpöpumpputyyppi Suomessa. Toiseksi yleisin lämpöpumppuvalinta on Suomessa maalämpöpumppu. Poistoilmalämpöpumput jäävät ilma-vesilämpöpumppujen kanssa harvinaisemmaksi lämpöpumppuhankinnaksi Suomessa. (Kuva 15.) Ilmalämpöpumppujen suosio todennäköisesti perustuu niiden tuomiin säästöihin kotitaloudessa ja verrattain alhaiseen hankintahintaan. Ilmalämpöpumppu onkin kuvassa 15 esiintyvistä lämpöpumpputyypeistä halvin ratkaisu, vaikka on järjestelmänäkin hieman erilainen.



Kuva 15. Eri lämpöpumppujen kumulatiivinen myynti Suomessa (31).

Ilmalämpöpumpun kohdalla aurinkopaneelien tuotannon ohjauksen hyödyntämisen potentiaali voisi olla jäähdytyskäytössä, sillä aurinkopaneelit tuottavat parhaiten energiaa kesäaikaan. Aurinkoisina kesäpäivinä lämmitystarve on pieni ja riippuen sääolosuhteista ilmalämpöpumpun toiminta saattaa olla pääsääntöisesti jäähdytyskäytössä. Ilmalämpöpumpun hyödyntäminen jäähdytyskäytössä tuo jonkin verran lisäkustannuksia, sillä jäähdytys tapahtuu sähköenergian avulla. Teoriassa aurinkopaneelien ylituotannon ohjauksella sisätilan jäähdytyskäyttöön voitaisiin vähentää ostosähköstä koituvia lisäkustannuksia. Jäähdytyskäytön pienentyvät kustannukset tarkoittaisivat myös ilmalämpöpumpun parempaa takaisinmaksuaikaa ja suurempia säästöjä lämmityksessä. Ilmalämpöpumpun tuomat säästöt ovat kuitenkin niin merkittäviä, että kuumien kesäpäivien aikainen ajoittainen jäähdytys ilmalämpöpumpulla ei ole huomattava lisäkustannus. Rakennusmaailma-lehden asiantuntijahaastatteluiden mukaan ilmalämpöpumppujen jäähdytyskäytöstä aiheutuvat kustannukset ovat pieniä ja jäähdytyksestä koituva vuosikulutus noin 100 - 1500 kWh. (32.) Vattenfallin asiantuntijan laskutoimitusten mukaan ilmalämpöpumpulla jäähdyttäminen 20 - 30 vuorokauden ajan helteillä maksaisi noin 0,30 - 1,4 euroa vuorokaudessa (33). Lukemien pohjalta voidaan todeta, että aurinkopaneelien

ylituotannon ohjaaminen ilmalämpöpumpun jäähdytyskäyttöön ei ole tarpeellista, sillä mahdollinen hyöty jää liian pieneksi, ottaen etenkin huomioon, että ilmalämpöpumppu toimii jäähdytyskäytössä vain kuumimpina kesäpäivinä eikä ympärivuotisesti. Aurinkopaneelien ylituotannon ohjaus tulisi siis kohdistaa kotitaloudessa muihin kohteisiin kuin ilmalämpöpumpulla jäähdyttämiseen.

4.5 Muut lämpöpumppujärjestelmät

Muita kotitalouksissa mahdollisia lämpöpumppuratkaisuja ovat poistoilmalämpö- ja ilma-vesilämpöpumppu. Molemmat lämmitysratkaisut ovat harvinaisempia, kuten kuvasta 15 kävi ilmi. Ilmalämpöpumpun korkeaa kumulatiivista myyntiä ei voi suoraan verrata poistoilmalämpöpumppuun tai ilma-vesilämpöpumppuun, sillä ilmalämpöpumppu toimii aina vain tukilämmityslähteenä ja on hankintana halvempi kuin muut.

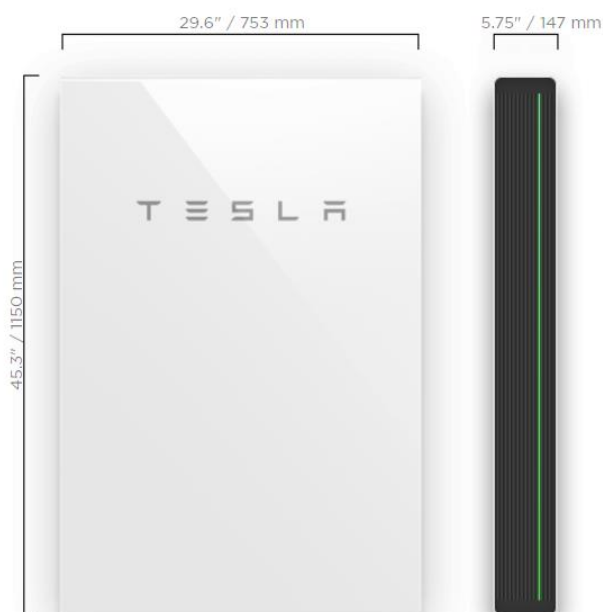
Lämpöpumppujärjestelmien kohdalla aurinkopaneelien ylituotannon hyödyntäminen voisi tapahtua esimerkiksi viilennyksessä tai käyttöveden lämmityksessä. Ottaen huomioon edellisen luvun johtopäätös lämpöpumpun jäähdytystarpeen pienistä kustannuksista, on syytä painottaa lämpöpumppujen potentiaalin olevan lämpimän käyttöveden tuotannossa. Lämpimän käyttöveden tarve on vuositasolla merkittävä energiamäärä, josta koituvia ostosähkön kustannuksia voitaisiin teoriassa vähentää aurinkopaneelien ylituotannon avulla.

4.6 Sähkövarastot

Energian varastointi on ainoa tekninen ratkaisu, jolla saadaan aurinkopaneelien ylituotanto talletettua myöhempää käyttöä varten. Opinnäytetyössä esiintyvät muut ratkaisut ovat kulutuskohteita, joiden täytyy hyödyntää aurinkopaneelien ylituotanto sillä hetkellä. Energian varastoinnilla tarkoitetaan pääsääntöisesti sähkökemiallista akkua, kuten litium-ioniakkua. Muut energian varastointimenetelmät, kuten vetykaasuna varastoiminen eivät ole kuluttajapuolella toteuttavia energian varastointiratkaisuja. Opinnäytetyössä keskityttiin energian varastoinnin tarkastelussa yksinomaan sähkökemiallisiin sähkövarastoihin eli akkuihin, sillä niissä on eniten potentiaalia kuluttajapuolen energian varastointiratkaisuissa.

Sähkövarastot tarjoavat yksinkertaisen ja toimintavarman ratkaisun aurinkopaneelien ylituotannon varastointiin ja näin energiaomavaraisuuden parantamiseen, mutta ongelmaksi muodostuu järjestelmän hinta. Sähkövarastot ovat kuluttajapuolella vielä erittäin kalliita ja investointina pidentävät huomattavasti aurinkopaneelijärjestelmän takaisinmaksuaikaa energiaomavaraisuuden parantumisesta huolimatta. Sähkövarastojen hinnat laskevat kuitenkin jatkuvasti ja tulevaisuudessa kuluttajapuolella on todennäköisesti saatavilla huomattavasti halvempia ratkaisuja.

Kuvassa 16 on Teslan Powerwall -sähkövarasto, joka on yksi markkinoilla myytävistä sähkön varastointiratkaisuista. Sähkövarasto on tarkoitettu esimerkiksi oman aurinkopaneelijärjestelmän ylituotannon varastointiin, jolloin energiaomavaraisuutta saadaan nostettua. Järjestelmän varastointikapasiteetti on 13,5 kWh, joka energiamääränä voi tarkoittaa sähköautomallista riippuen jopa 100:n kilometrin toimintasädettä. (34.)



Kuva 16. Tesla Powerwall -sähkövarasto (34).

Tämän kaltaiset sähkövarastot kotitalouksissa parantaisivat huomattavasti energiaomavaraisuutta ja voisivat toimia sähkökatkosten aikana varavoimana turvaten sähköenergian saannin. Ongelmaksi kuitenkin näissä muodostuu järjestelmien

hinnoittelu, jonka seurauksena harvemmalla aurinkopaneelijärjestelmän omistajalla on sähkövarasto liitettynä kotitalouteen. Uusiutuvan energian varastointiin soveltuvia sähkövarastoja saattaa ilmestyä markkinoille kasvavissa määrin myös sähköautojen akkujen uusiokäyttämisen ja kierrätyksen seurauksena. Sähköauton akkujen varastointikapasiteetin laskiessa liian alhaiseksi ne eivät enää sovellu ajoneuvokäyttöön, mutta niiden heikentynyttä kapasiteettia voitaisiin mahdollisesti hyödyntää uusiutuvan energian varastoimisessa. Tällaiset sähkövarastot ovat kiertotalousmallin mukaisia ratkaisuja ja etenevissä määrin kokeilussa, johtuen sekä akkuvalmistuksen materiaalikustannuksista että ympäristövaikutuksista. Tulevaisuudessa onkin mahdollista, että täysin uusien akkujen ohelle kuluttajapuolen markkinoille tulee saataville halvempia kierrätettyjä tai käytettyjä akkuja. Tällaiset olisivat etenkin kuluttajapuolen energian varastointitarpeisiin soveltuvia ja mahdollisesti kannattavampia kuin nykyiset kalliimmat sähkövarastot. Sähköautojen vanhojen akkujen uusiokäyttö energian varastoinnissa voi soveltua enemmän suurten kohteiden energianvarastointiin tai muihin sovelluksiin. Vanhat akut voivat olla vikaantuessaan paloturvallisuusriski kotitaloudessa, eikä niille välttämättä voida myöntää samanlaisia takuita kuin uusille sähkövarastoille. Markkinoilla on kuitenkin saatavilla jo vanhojen sähköautojen akkuja sähkövarastoina, myös kotitalouksiin (35).

4.7 Yhteenveto

Yhteenvetona eri ylituotannon ohjauskohteista voidaan todeta, että suurin potentiaali on lämpimän käyttöveden tuotannossa ja sähköauton latauksessa. Molemmat ovat merkittäviä energiankulutuskohteita kotitaloudessa ja niihin ylituotannon ohjaus on teknisesti toteutettavissa. Lämpimän käyttöveden tuottamiseen markkinoilta löytyy useiden erilaisten ohjauskomponenttien lisäksi valmiita tuotannon ohjausmoduuleita, jotka ohjaavat aurinkosähköä lämpimän käyttöveden tuottamiseen joko lämminvesivaraajalle tai lämpöpumpulle. Sähköauton latauksessa kulutuskäyttäytyminen tunnistettiin mahdollisesti vaikeuttavaksi tekijäksi oman aurinkosähkötuotannon hyödyntämisen suhteen. Eri kuluttajilla on kuitenkin erilaiset lataustarpeet ja -vaatimukset. Sähköauton kotilatauslaitteistakin löytyy useilta eri valmistajilta mahdollisuus hyödyntää oman aurinkopaneelien tuotantoa. Tällaisissa ratkaisuissa sähköauton latauslaitteen latausteho esimerkiksi säätyy automaattisesti aurinkopaneelien ylituotannon mukaan.

Jäähdytyksen tuottaminen havaittiin useissa lämpöpumppujärjestelmissä mahdolliseksi toiminnoksi, jonka tarve voi olla kotitaloudessa kohtalainen aurinkopaneelien parhaimpina tuotantoaikoina. Todettiin kuitenkin, että jäähdytyksen tuottaminen ei ole sopiva tuotannon ohjauksohje, johtuen jäähdytyksen vaihtelevasta tarpeesta ja sen pienestä energiankulutuksesta. Lämpöpumppujen tuoma säästö on usein niin merkittävä, että kesällä tapahtuva jäähdytys ei aiheuta merkittäviä lisäkustannuksia suhteessa saatuihin säästöihin. Kotitalouden lämmityksen tuottaminen on mahdollista useilla työssä esiintyvillä lämpöpumppujärjestelmillä ja usein lämmin käyttövesi ja vesikiertoinen lämmitys molemmat saavat lämpöenergiansa samoista varaajasäiliöistä. Lämmityksen tarve on yleensä kuitenkin pienempi aurinkosähkön optimaalisina tuotantoaikoina, joten lämpimän käyttöveden tuotto on todennäköisin tehoa parhaiten hyödyntävä kohde ylituotannon aikaan. Jotta aurinkopaneelien ylituotanto saadaan tehokkaammin hyödynnettyä ja energiaomavaraisuutta parannettua, aurinkopaneelien ylituotanto tulisi kohdistaa potentiaalisimpiin kohteisiin, kuten mainittuun käyttöveden lämmitykseen ja sähköauton lataukseen.

5 Laskelmat

Eri tekniikoiden soveltuvuutta ylituotannon ohjauksen kohteeksi havainnollistettiin erilaisilla laskutoimituksilla, joiden avulla saatiin kartoitettua ratkaisun soveltuvuutta tuotannon ohjauksen kohteeksi. Tarkemman tarkastelun kohteeksi valikoituivat lämminvesivaraaja ja sähköauton lataus, sillä opinnäytetyöaiheen toimeksiantaja Helen Oy:n pyynnöstä nämä tekniikat olivat ensisijaisia kohteita ja opinnäytetyön aikaisempien tarkastelujen pohjalta havaittu potentiaalisimmiksi kohteiksi. Tässä luvussa tarkastelun kohteeksi valikoituivat edellä mainittujen ratkaisuiden soveltuvuus ylituotannon ohjauksen kohteeksi teoreettiselta pohjalta. Ratkaisuiden soveltuvuutta mallintavat laskutoimitukset auttavat kannattavuuden ja mahdollisesti saavutettavien hyötyjen arvioinnissa.

5.1 Ylituotanto ja lämminvesivaraaja

Ylituotannon ohjaaminen kotitalouden lämminvesivaraajalle tapahtuu kytkemällä lämminvesivaraajan sähkövastukset päälle ylituotannon aikaan. Vaihtosuuntaaja tällöin ohjaa aurinkopaneelilta tulevan tehon lämminvesivaraajan sähkövastuksille. Lämminvesivaraajassa termostaatti sammuttaa varaajan veden lämmityksen, kun saavutetaan termostaatille asetettu lämpötila. Luvussa pyrittiin mallintamaan mahdollisia säästöjä, joita

voitaisiin onnistuneella aurinkopaneelien ylituotannon ohjauksella saavuttaa lämpimän käyttöveden tuotannosta.

Lämminvesivaraajan tehontarve päivässä on arviolta noin nelihenkiselle perheelle 14 kWh, jos huomioidaan pelkästään lämpimän käyttöveden tarve, eikä oleteta varaajan kattavan käyttöveden lisäksi muuta lämmöntarvetta (Kuva 17). Lämminvesivaraajan vuosikulutus olisi kyseisessä kohteessa kuvan 17 mukaan 5 100 kWh, joka tarkoittaa 0,15 €/kWh sähkön hinnalla 765 euron vuosikustannuksia. Lämminvesivaraajan lämmityskustannuksista on siis potentiaalia säästää aurinkopaneelien ylituotannon avulla. Sähkön hinta laskutoimituksessa perustuu Tilastokeskuksen ilmoittamaan sähkön hinnan lukuun suorasähkölämmitteiselle pientalolle, jossa vuotuinen energiankulutus on 18 000 kWh (36). Laskutoimitukseen valikoitui 18 000 kWh vuodessa kuluttavan pientalon sähkön hinta, sillä sen vuosikulutus on niin korkea, että siihen sopisi kulutuksen puolesta aurinkopaneelijärjestelmä.

Mitoitus esimerkki 2: 4-henkinen perhe omakotitalossa ja 350 litran vesivaraaja – Aurinkolämpöä pelkkään käyttöveteen

Käyttöveden päiväkulutus	11 kWh/vrk (= 4000 kWh / a)
Varaajan lämpöhäviöt	noin 3 kWh/vrk (= 1100 kWh / a)
Yhteensä	noin 14 kWh/vrk (= 5100 kWh / a)

Kuva 17. Perheen käyttöveden tarve vuorokaudessa 350 litran varaajalla (37).

Riippuen kohteista, joissakin kotitalouksissa lämminvesivaraajan lämmintä vettä käytetään myös vesikiertoisessa lämmityksessä, jolloin energiankulutus voi kasvaa entisestään. Aurinkopaneelijärjestelmien päivätuotto voi olla järjestelmän koosta ja suuntauksista riippuen jopa kymmeniä kilowattitunteja. Aurinkopaneelien tuotanto pystyy siis tuotantolukemiensa puolesta kattamaan hyvin lämminvesivaraajan päivittäisen energiatarpeen tai merkittävästi vähentämään ostosähkön tarvetta.

Lämmin käyttövesi aurinkopaneelien ylituotannon ohjauksen kohteena vaikutti työssä esitettyjen teoreettisten arvioiden pohjalta potentiaaliselta ja toteutuskelpoiselta ratkaisulta. Lämpimän käyttöveden tarve on päivittäinen ja merkittävä energiankulutuskohde,

varsinkin jos kotitalouteen kuuluu useampi asukas. Myös kulutuskäyttäytyminen voi huomattavasti nostaa lämpimän käyttöveden määrää kotitaloudessa. Kuudennessa luvussa tarkastellaan sähkövastuksella toimivan lämminvesivaraajan ja aurinkopaneelien ylituotannon yhdistämistä oikeiden käytännön hankkeiden tulosten pohjalta. Lopullinen yhteenveto muodostettiin yhdistämällä ja huomioimalla tässä luvussa esiintyneet teoreettiset arviot ja käytännön hankkeiden mittaustulokset.

5.2 Ylituotanto ja sähköauton lataus

Laskuesimerkkiin valittiin tarkasteltavaksi Suomen eniten vuonna 2020 (ensimmäisen neljänneksen aikana) rekisteröity sähköauto (Taulukko 1), eli yhdysvaltalainen Tesla Model 3 (38, s. 19). Ylituotannon ja latauksen yhdistämiseen liittyvät laskutoimitukset toteutettiin kyseisen automallin teknisillä lukemilla. Laskutoimituksilla saatiin havainnollistettua ylituotannon ja sähköauton latauksen yhdistämisen kannattavuutta kuluttajan kotitaloudessa. Käytännössä kuluttajalta täytyisi tilanteessa löytyä sähköauton lisäksi aurinkopaneelijärjestelmä ja sen ylituotantoa tarvittaessa hyödyntävä sähköautojen latauslaite.

Taulukko 1. Sähköauton (Tesla Model 3 Standard Range) tekniset tiedot (39).

Auto	Tesla Model 3 Standard Range
Auton sisäisen laturin teho	11 kW
Akuston kapasiteetti	50 kWh
Kulutus	151 Wh/km

Suomessa keskimääräinen ajomäärä vuorokaudessa henkilöautoilla on 52 kilometriä (40). Tesla Model 3 Standard Range automallin energiankulutus on 151 Wh/km (39), eli 52 kilometrin päivittäinen ajosuorite tarkoittaa 7,85 kWh kulutettua energiaa. Huomioitavaa on, että autovalmistajien ilmoittamat kulutuslukemat voivat poiketa todellisista kulutuslukemista, sillä ajosuorituksen energiankulutukseen vaikuttavat auton lisäksi ajotyylit, nopeus ja sääolosuhteet. Päivittäisen ajosuorituksen latauskustannukset saadaan seuraavan kaavan mukaisesti (Kaava 4).

$$7,85 \text{ kWh (kulutus päivässä)} \times 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \text{ (sähkön hinta)} = 1,178 \text{ €} \quad (4)$$

Päivittäisen ajomäärän lataaminen kotona maksaa sähköautoilijalle keskimäärin 1,178 euroa päivässä, mikä tekee vuodessa lähes 430 euroa latauskustannuksia. Vuosikustannusten arvion oletuksena on, että jokainen lataus tapahtuu kuluttajan kotitaloudessa, vaikka todellisuudessa sähköautoilija voi hyödyntää useita eri julkisia latauspisteitä, kuten kauppakeskusten tai parkkihallien latauslaitteita. Kaava ei myöskään sisällä latausprosessiin kuuluvia lämpöhäviöitä, jotka ovat kuitenkin pieniä suhteessa lataustehoon. Jokaista oman aurinkopaneelijärjestelmän latauksessa hyödynnettyä kilowattituntia kohden säästetään 15 senttiä sähköauton käyttökustannuksista. Aurinkosähkön hyödyntäminen sähköauton latauksessa toisi tasaisesti säästöä latauskustannuksista, mutta keskimääräisellä ajosuoritteella noin euron päivässä. Jos sähköauton ajosuorite tai kulutus on päivässä suurempi, niin luonnollisesti aurinkosähköä hyödyntämällä voidaan säästää latauksesta vielä enemmän. Tämä on kuitenkin riippuvainen aurinkopaneelijärjestelmästä ja toteutuneesta aurinkosähkön tuotannosta.

Taulukossa 2 on vertailu sähköauton latauksen päästöistä ja hinnasta, kun ladataan joko verkosta saatavalla sähköllä tai aurinkopaneelien tuotannolla. Taulukossa 2 verkkosähkön CO₂-päästöiksi on asetettu 72 g/kWh, joka on saatu Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin ilmoittamasta avoimesta sähkömarkkinadatasta. 72 g/kWh on Suomessa kulutetun sähkön päästökertoimen keskiarvo aikavälillä 1.1. - 30.6.2020. (41.) Aurinkopaneeleilla tuotetun sähkön päästökertoimen keskiarvo on taulukossa 2 ilmoitettu 0 g/kWh, sillä paneelit eivät toimiessaan tuota päästöjä, vaikkakin niiden valmistusprosessi tuottaa. Aurinkopaneelien tuotannolla tapahtuva lataus on arvioitu taulukossa ilmaiseksi. Oletuksena luvulle on, että aurinkopaneelien tuotannon hyödyntämisellä vältetään ostosähköstä koituvia kustannuksia.

Taulukko 2. Vertailu latauksen päästö- ja kustannuseroista aurinkosähköllä ja verkkosähköllä.

	Latauksen päästöt (CO ₂)	Latauksen hinta (kerta)
Lataus verkkosähköllä	72 g/kWh	1,178 €
Lataus aurinkosähköllä	0 g/kWh	0 €

Aurinkopaneelien ylituotannon hyödyntäminen sähköauton latauksessa ei ainoastaan vähennä vuotuisia autoilun latauskustannuksia ja paranna kotitalouden energiaomavaraisuutta, vaan myös vähentää sähköautoilun latauksesta koituvia päästöjä. Aurinkosähköllä sähköauton lataaminen vähentää sähköautoilun kokonaispäästöjä entisestään, sillä aurinkopaneelit eivät energian tuotannon aikana tuota päästöjä lainkaan. Kuluttajan onkin helpointa vähentää autoilunsa päästöjä sähköautohankinnan ohella valitsemalla päästötön lataussähkö, kuten aurinkosähkö. Seuraavalla kaavalla saadaan sähköautoilun päästöt ajettua kilometriä kohden (Kaava 5). Sähkön päästökerroin on riippuvainen sähkön tuotantotavasta ja ajoneuvon kulutuslukemat ovat ajoneuvokohtaisia.

$$\text{Sähkön päästökerroin} \left(\frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} \right) \times \text{Sähköauton kulutuslukema} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right) = \text{Päästöt} \left(\frac{\text{CO}_2}{\text{km}} \right) \quad (5)$$

Yhteenvetona sähköauton latauksen ja aurinkopaneelien ylituotannon yhdistämisestä voidaan todeta, että optimoimalla latausprosessia aurinkopaneelien ylituotannon avulla saadaan säästöä aikaan. Vaikka sähköautoilun käyttökustannukset ovat pienemmät kuin polttomoottoriauton, silti hyödyntämällä mahdollisimman paljon oman aurinkopaneelin tuotantoa saadaan sekä alhaisemmat latauksen päästöt että halvemmat latauskustannukset. Sähköauton lataus voidaan teknisesti yhdistää aurinkopaneelien toimintaan, esimerkiksi hankkimalla sähköauton latauslaite, jonka mukana tuleva ohjausmoduuli hoitaa kommunikoinnin aurinkopaneelijärjestelmän kanssa. Aurinkosähkön hyödyntäminen latausprosessissa edellyttää latauksen tapahtuvan samaan aikaan kuin aurinkopaneelien tuotanto, sillä latauslaite ei voi varastoida energiaa. Tulevaisuudessa sähköauton rooli

voi kasvaa energian varastoinnin osalta, jolloin sähköautoon voitaisiin sekä ladata aurinkosähköä että purkaa tarvittaessa sähköauton akun energiasisältöä kotitalouden tarpeisiin. Tällaiset kaksisuuntaiset lataustekniikat tunnetaan nimeltä V2G (Vehicle to Grid), jolla tarkoitetaan mahdollisuutta ladata sekä auton akkua että purkaa akun energiaa sähköverkon tarpeisiin. Aurinkopaneelien ylituotannon hyödyntäminen sähköauton latauksessa voi edesauttaa edellä mainittujen tekniikoiden kehittymistä sekä olla edeltävänä tekniikkana kaksisuuntaiselle lataukselle kotitaloudessa. Toistaiseksi kaksisuuntaiset latausratkaisut ovat yleensä joko kokeiluhankkeita tai julkisia latauspisteitä.

6 Käytännön hankkeet

Opinnäytetyön tarkoitus oli kartoittaa erilaisten kulutuskohteiden soveltuvuutta ylituotannon kohteeksi erilaisten laskutoimitusten avulla ja kartoittaa näiden avulla parantunutta energiaomavaraisuutta ja tehostunutta aurinkosähköjärjestelmän takaisinmaksuaikaa. Näiden arvioiden ohella Helen Oy:n käytännön hankkeiden kautta saatavat mittaustulokset auttoivat arvioimaan ohjauksen todellisia tuloksia ja potentiaalia. Työssä tarkasteltiin kahta kuluttajapuolen kohteen tuotanto- ja kulutusdataa, joissa aurinkopaneelien ylituotanto yhdistettiin releohjauksella lämminvesivaraajan veden lämmittämiseen. Tarkoitus oli tuloksien avulla tarkemmin tarkastella releohjauksen tuomaa mahdollista parantunutta energiaomavaraisuutta ja pienentynyttä ostosähkön tarvetta ilta-aikaan.

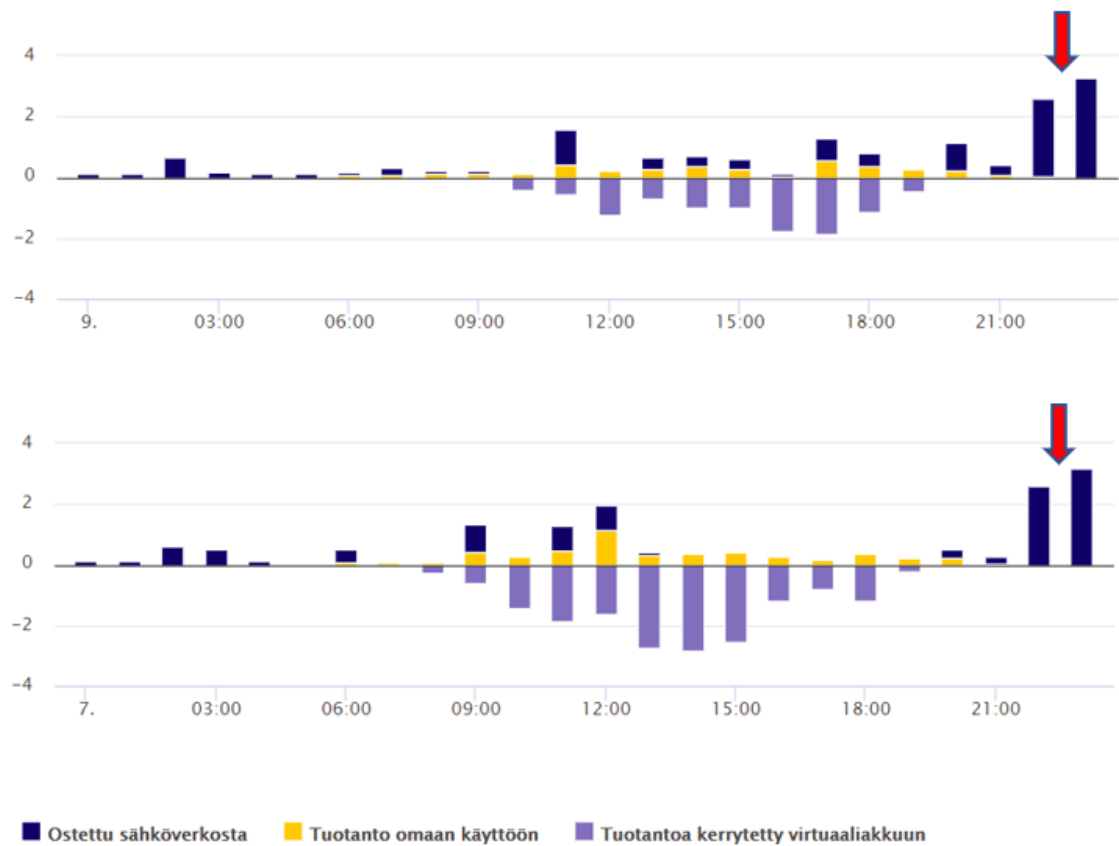
Molemmissa kohteissa oli aurinkopaneelijärjestelmä, sähkövastuksella toimiva lämminvesivaraaja ja ylituotantoa ohjaava releohjaus. Tarkoitus oli, että aurinkopaneelien ylituotannon aikana, rele kytkeytyy päälle ja ohjaa aurinkosähköä lämminvesivaraajan vastukselle. Toimiessaan kulutusdatasta olisi nähtävissä pienentynyt energiankulutus lämminvesivaraajan tyypillisten käyttöaikojen aikaan, eli aamuisin ja iltaisin. Yleensä kotitalouksissa ihmiset käyttävät joko aamuisin tai iltaisin eniten lämmintä käyttövettä. Huomioitavaa seuraavaksi esiintyvissä kotitalouksien energiankulutus- ja tuotantotiedoissa on aikaisemmin mainittu sähkövaiheiden tuotanto- ja kulutuksen mittausten menetelmästä aiheutuva yhtäaikainen sähkön osto ja varastointi. Violetti alaspäin suuntautunut palkki näyttää virtuaaliakkuun varastoituneen energian määrän. Virtuaaliakku on Helen Oy:n tarjoama palvelu, jonka avulla autetaan pientuottajia tehostamaan oman tuotantonsa käyttöä. Kyseessä ei ole fyysinen sähkövarasto, kuten akku, vaan malli tarjota asiakkaille enemmän tietoa kotinsa energianhallintaan. Virtuaaliakku samalla tarjoaa

mahdollisuuden varastoida ylituotantoa kuukausittain. (42.) Jokaisen esitetyn päivän kohdalla ylituotantoa on varastoitunut virtuaaliakkuun, vaikka sähköä on ostettu sähköverkosta saman tunnin aikana. (Kuva 18.) Tämä johtuu sähkövaiheiden mittausmenetelmästä.

6.1 Ensimmäinen tarkastelukohde

Ensimmäisessä tarkastelukohteessa on aurinkopaneelijärjestelmä, sähkövastuksella toimiva lämminvesivaraaja ja erikseen asennettu releohjaus. Kohteessa oli ennen releohjaus, joka hyödynsi yö sähköä käynnistäen releen kello 22.00. Nykyinen releohjaus käynnistyy aurinkopaneelien ylituotannon mukaan. Toteutunutta muutosta täytyi siis etsiä kello 22.00 alkavasta kulutuksesta. Toimiessaan releohjaus olisi siirtänyt merkittävän osan kello 22.00:n jälkeen alkavasta kulutuksesta aurinkopaneelien tuotannon ajalle. Seuraavaksi tarkasteltiin kotitalouden energiatasetta sekä ennen releen toimintaa että sen ajalta, jotta saatiin visualisoitua mahdollinen muutos.

Kuvassa 18 näkyy ensimmäisen kotitalouden energiankulutus kahtena eri päivänä ennen lämminvesivaraajaan aurinkopaneelien ylituotantoa ohjaavaa releohjausta. Molempina päivinä oli ilta-aikaan selkeät kulutuspiikit, jotka todennäköisesti aiheutuivat lämminvesivaraajan sähkövastuksen käytöstä. Huomattavaa kuvassa 18 on aurinkoenergian päiväsaikaan toteutunut tuotanto, josta suurin osa on varastoitunut virtuaaliakkuun. Tämä virtuaaliakkuun varastoitunut tuotanto on juuri sitä ylituotantoa, jonka avulla voitaisiin kattaa varaajan tehontarve päiväsaikaan. Joidenkin tuntien kohdalla on nähtävissä päällekkäin sekä sähköverkosta ostamista että ylituotannon varastointia virtuaaliakkuun, johtuen aikaisemmin mainitusta sähkövaiheiden mittausmenetelmästä.

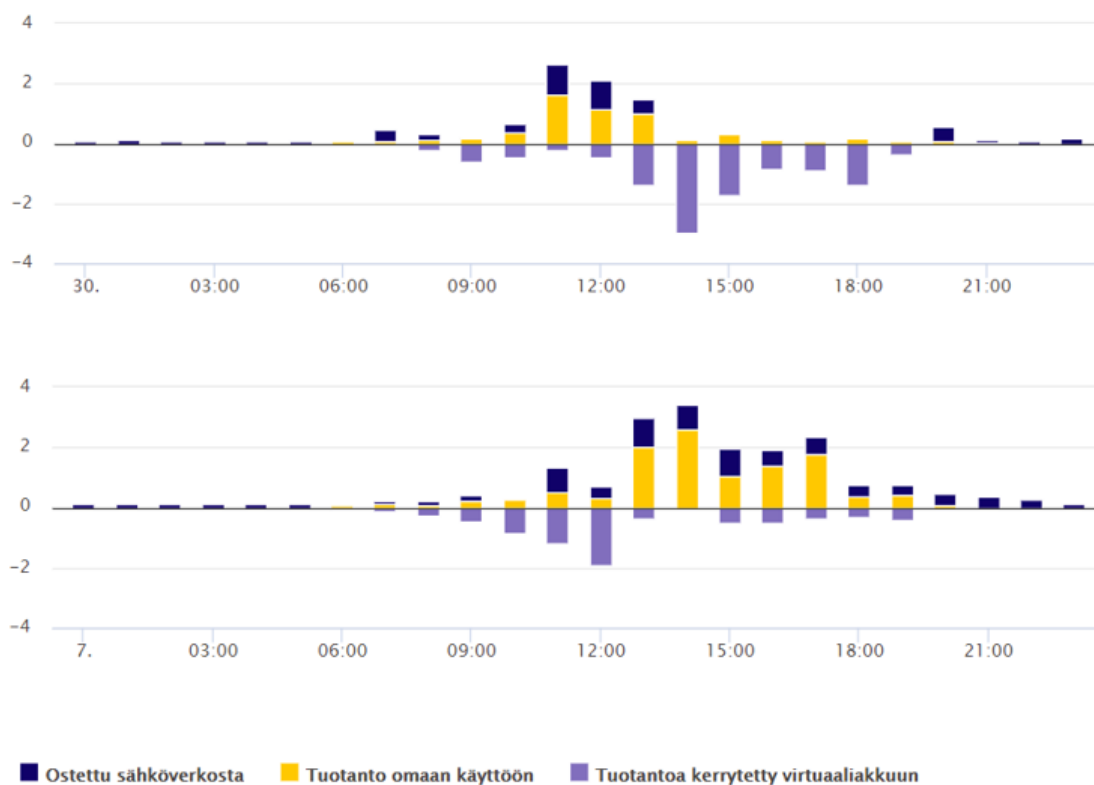


Kuva 18. Kotitalouden 1. energiatase kahtena eri päivänä ennen nykyistä releohjausta.

Päivällä tapahtuva aurinkoenergian tuotto on ollut toisena päivänä tarpeeksi suurta, jotta se voisi kattaa illalla tapahtuvan käyttöveden lämmityksen. Kuvassa 18 esiintyvien päivien energiankulutus oli molempina päivinä 16 kWh, josta aurinkopaneelien tuotanto kattoi toisena päivänä 25 % ja toisena 31,25 %. Päivien energiaomavaraisuuslukemat ovat siis olleet 25 % ja 31,25 %. Saman kohteen tuotanto- ja kulutustietoja tarkastelemalla releohjauksen asentamisen jälkeen oli nähtävissä suurten kulutuspiikkien selkeä väheneminen kello 22.00:sta eteenpäin (Kuva 19). Aikaisemmin kohteen kulutustiedoista oli nähtävissä ilta-aikaan kello 22.00:sta eteenpäin ajoittain yli 2 kWh:n tuntikohtainen kulutus. (Liite 1.)

Kuvassa 19 näkyy saman kotitalouden energiankulutus- ja tuotantolukemat kahdelta eri päivältä releohjauksen ollessa toiminnassa. Kuvassa 19 ylempänä esitetyn päivän energiankulutus oli 10 kWh, josta puolet tapahtui aurinkopaneelien tuotannolla. Päivän energiaomavaraisuuslukema oli siis 50 %. Lukema oli 18,75 - 25 prosenttiyksikköä korkeampi

kuin aikaisemmin esitetyt energiaomavaraisuuslukemat ennen toimivaa releohjausta. Kuvassa 19 alempana esiintyvän päivän aikana energiankulutus oli 19 kWh, josta 11 kWh tapahtui aurinkopaneelien tuotannolla. Päivän energiaomavaraisuuslukema oli lähes 58 %.

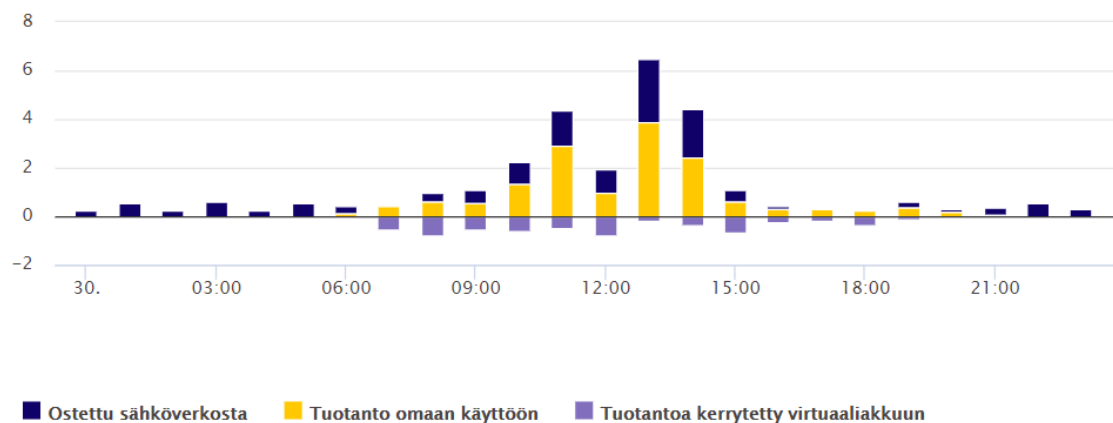


Kuva 19. Kotitalouden 1. energiatase kahtena eri päivänä releohjauksen ollessa toiminnassa.

Kyseisessä kohteessa oli nähtävissä useammalta päivältä, että ilta-ajan kulutus ei ole saavuttanut entisiä lukemiaan (Liite 1). Ilta-ajan kulutus todennäköisesti olikin lämminvesivaraajan käytöstä peräisin. Kohteen osalta voitaisiin siis näiden tietojen ja tulkinnan kautta todeta, että releohjaus on vähentänyt illalla tapahtuvia kulutuspiikkejä ja ohjannut tehontarvetta aurinkopaneelien ylituotantoajoilta. Kohteen tuotanto- ja kulutustietojen tarkastelu kuukauden ajalta ennen nykyistä releohjausta paljasti, että ilta-aikaan kello 21.59 - 23.59 ostosähkön määrä oli keskimäärin 4,00 kWh. Saman kestoisen aikavälin tarkastelu nykyisen releohjauksen toiminta-ajoilta paljasti, että keskimääräinen ilta-aikaan kello 21.59 - 23.59 toteutunut ostosähkön määrä oli 0,57 kWh. (Liite 1.) Releohjauksen toimituksessa toteutunut ostosähkön määrä oli siis noin 14 % aikaisemmasta määrästä kyseisellä aikavälillä. Releohjaus on siis huomattavasti vähentänyt ilta-ajan kulutusta.

6.2 Toinen tarkastelukohde

Toisessa kohteessa, johon asennettiin aurinkopaneelijärjestelmän ja lämminvesivaraajan yhdistävä releohjaus, oli nähtävissä hyvin samankaltaisesti matalaa ilta-ajan energiankulutusta (Liite 2). Kuvassa 20 esitetään kohteen tuotanto- ja kulutus eräänä päivänä releohjauksen ollessa toiminnassa. Aurinkopaneelien tuotantoaikaan oli huomattavaa energiankulutusta, josta suurin osa on katettu aurinkosähköllä. Kohteessa releohjaus lämminvesivaraajalle asennettiin aurinkopaneelien asennuksen yhteydessä.



Kuva 20. Kotitalouden 2. energiatase eräänä päivänä releohjauksen ollessa käytössä.

Kohteesta ei ollut tarvittavaa aineistoa toteuttaa samankaltaista vertailua, kuten ensimmäisen tarkastelukohteen kohdalla. Nykyaineisto on kuitenkin riittävä toteamaan releohjauksen toiminnallisuuden kohteessa. Eri päiviä tarkasteltaessa ei paljastunut suuria määriä kulutuspiikkejä ilta-ajalta, jolloin voidaan arvioida kohteen releohjauksen toimivan sille määritellyllä tavalla. Satunnaisesti esiintyi suuria kulutuspiikkejä ilta-aikaan, mutta näiden alkuperää ei pystynyt aineiston avulla varmistamaan. Suuret kulutuspiikit olivat satunnaisia ja selkeästi poikkeavia aineiston keskiarvosta. (Liite 2.)

6.3 Johtopäätös

Tuloksia vertaillessa on huomioitavaa, että on haastavaa todeta eri päivien vertailukelpoisuus keskenään. Toisina päivinä kulutus voi olla illalla suurempi ja toisina päivinä kulutus voi olla poikkeuksellisen pieni, johtuen kulutuskäyttäytymisestä tai muista tekijöistä. Muut tekijät, jotka voivat vaikuttaa kulutuslukemien tulkintaan, ovat mahdolliset

lomat, jolloin asukkaat eivät ole välttämättä kotona, ja opinnäytetyön toteutusaikana vallinnut koronapandemia. Pandemiasta aiheutuneet rajoitukset ovat voineet lisätä kotitaloudessa tapahtuvaa kulutusta, sillä monilla siirtyi työskentely kotiin. Opinnäytetyössä oli huomioitava nämä tekijät, minkä takia oli tärkeämpää keskittyä pidemmän aikavälin muutoksiin kulutuksessa.

Tulevaisuudessa tarkempien johtopäätösten muodostaminen edellyttäisi keskenään vertailukelpoisia tuloksia ja pidemmän aikavälin seuranta, jolloin voidaan tarkemmin varmistua releohjauksen tuomista muutoksista kotitalouden energiaomavaraisuuteen. Opinnäytetyössä havaittiin kuitenkin käytössä olevasta energiankulutus- ja tuotantolukemista, että muutosta on tapahtunut odotetulla tavalla. Ensimmäisen tarkastelukohteen tuloksista oli nähtävissä huomattava muutos ilta-ajan ostosähkön määrässä. (Liite 1.)

7 Yhteenveto

Opinnäytetyö kartoitti mahdollisia ohjauskohteita ja -ratkaisuja aurinkopaneelijärjestelmän omistaville kotitalouksille energiaomavaraisuuden parantamiseksi. Työssä saatiin kartoitettua erilaisten kulutuslaitteiden soveltuvuus ja mahdolliset hyödyt sekä vahvistettua oikeiden tulosten avulla lämminvesivaraajan releohjauksen potentiaali ja toimivuus. Käytännön hankkeiden tulosten avulla oli mahdollista tarkemmin tarkastella tuotannon ohjauksen tuomaa todellista muutosta kotitalouden energiaomavaraisuuteen. Tulosten avulla pystyttiin toteamaan, että lämminvesivaraajan releohjauksella voidaan vähentää tuotannon ulkopuolella tapahtuvaa kulutusta ja tehostaa oman aurinkosähkön hyödyntämistä.

Aurinkopaneelijärjestelmien energiaomavaraisuuden parantaminen ylituotannon hyödyntämisen suhteen on kannattavinta toteuttaa ainakin toistaiseksi erilaisilla ylituotannon ohjausratkaisuilla, joita opinnäytetyössä käsiteltiin. Ohjausratkaisut, jotka voivat olla vaihtelevia toteutukseltaan, tarjoavat kuluttajalle yksinkertaisen ja kustannustehokkaan keinon parantaa omaa energiaomavaraisuutta ja vähentää sähköverkkoon myytävän aurinkosähkön määrää. Tulevaisuudessa sähköautojen, sähkön varastoinnin ja akkukierätyksen kehittyessä yhä enemmän kustannustehokkaimmiksi ja yleisimmiksi ratkaisuiksi on syytä kiinnittää huomiota erilaisten sähkön varastointiratkaisujen toteutuskelpoisuuteen kuluttajien pientuotannon yhteydessä. Suuri sähköautojen määrän kasvu ja akkuteollisuuden kehittyminen tuovat markkinoille todennäköisesti yhä halvempia ja kannattavampia kuluttajapuolen sähkön varastointiratkaisuja, joiden avulla energiaomavaraisuuden parantaminen voisi olla mahdollista toteuttaa.

Opinnäytetyö saavutti asetetut tavoitteet, sillä työn tulokset tukivat alkuperäistä hypoteesia energiaomavaraisuuden parantamisesta ja ylituotannon ohjauksen potentiaalista. Opinnäytetyön tuloksia ja johtopäätöksiä voidaan hyödyntää, kun suunnitellaan kotitalouteen aurinkopaneelien tuotannon ohjausta tai pohditaan erilaisten kulutuskohteiden soveltuvuutta energiaomavaraisuuden optimointiin. Huomioitavaa on, että aurinkopaneelien tuotannon hyödyntäminen ei aina välttämättä edellytä ulkoisten sähkökomponenttien avulla tapahtuvaa ohjausta. Kulutuskäyttäytymistä muuttamalla ja ajoittamalla kulutusta enemmän aurinkosähkön tuotantoajoille voidaan myös parantaa kotitalouden energiaomavaraisuutta.

Lähteet

- 1 Aurinkopaneelien hankintaopas. Verkkoaineisto. Helen Oy. <https://www.helen.fi/globalassets/aurinko/aurinkopaneeleiden_hankintaopas.pdf>. Luettu 6.8.2020.
- 2 Solar energy. Verkkoaineisto. IRENA. <<https://www.irena.org/solar>>. Luettu 30.7.2020.
- 3 Aurinkosähköjärjestelmään kuuluvat laitteet. Verkkoaineisto. Aurinkosähköäköttiin.fi. <<https://aurinkosahkoakotiin.fi/aurinkosahko-kokoonpano/>>. Luettu 30.7.2020.
- 4 Aurinkosähköteknologiat. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelmat/aurinkosahkoteknologiat>. Päivitetty 21.10.2019. Luettu 30.7.2020.
- 5 Tahkokorpi, Markku; Erat, Bruno; Hänninen, Pekka; Nyman, Christer; Rasinkoski, Asko & Wiljander, Mats. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into Kustannus.
- 6 FAQ aurinkopaneeli. Verkkoaineisto. Finnwind. <<https://finnwind.fi/aurinkopaneeli-usein-kysyttya/#half-cut>>. Luettu 30.7.2020.
- 7 Fronius Symo. Verkkoaineisto. Fronius International GmbH. <<https://www.fronius.com/en/photovoltaics/products/all-products/inverters/fronius-symo/fronius-symo-3-0-3-m>>. Luettu 6.8.2020.
- 8 Aurinkopaneelien sijoitus ja suuntaus. Verkkoaineisto. Aurinkosähköäköttiin.fi <<https://aurinkosahkoakotiin.fi/aurinkopaneelien-sijoitus-ja-suuntaus/>>. Luettu 6.8.2020.
- 9 Aurinkosähkö. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. <<https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto/aurinkovoima>>. Luettu 30.7.2020.
- 10 PVGIS. Verkkoaineisto. European Commission. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#PVP>. Päivitetty 15.10.2019. Luettu 30.7.2020.
- 11 Simply Electronics. 2016. What is a Relay? (Interactive!) - Electronic Basics 8. Verkkoaineisto. Simply Electronics. <<https://www.youtube.com/watch?v=n9renPKEtUc>>. Luettu 31.8.2020.

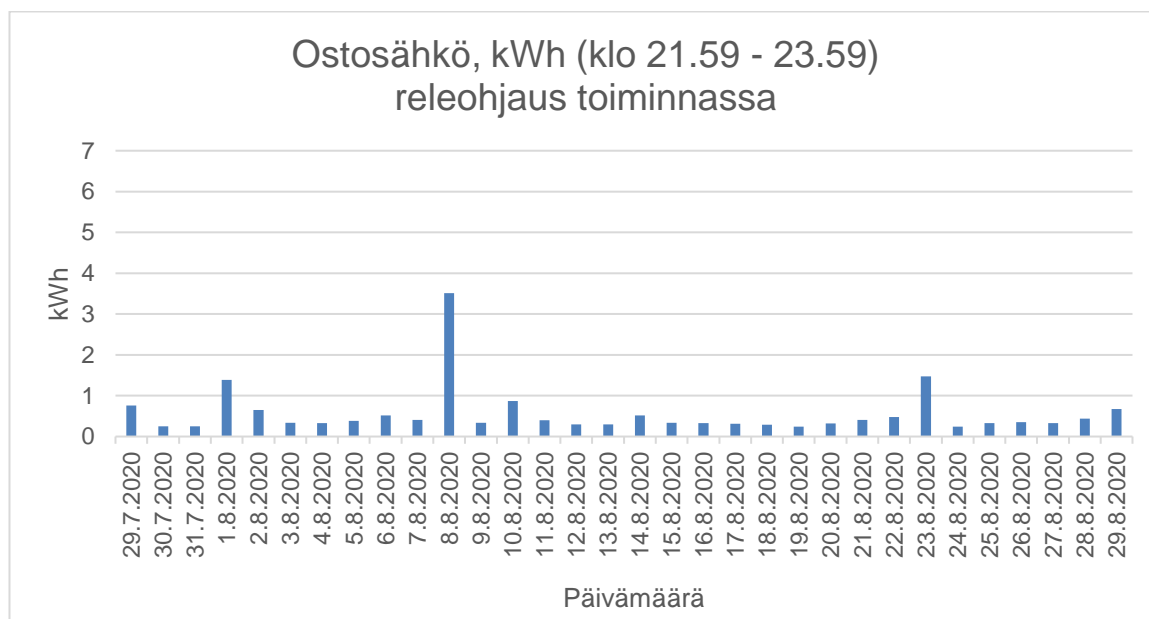
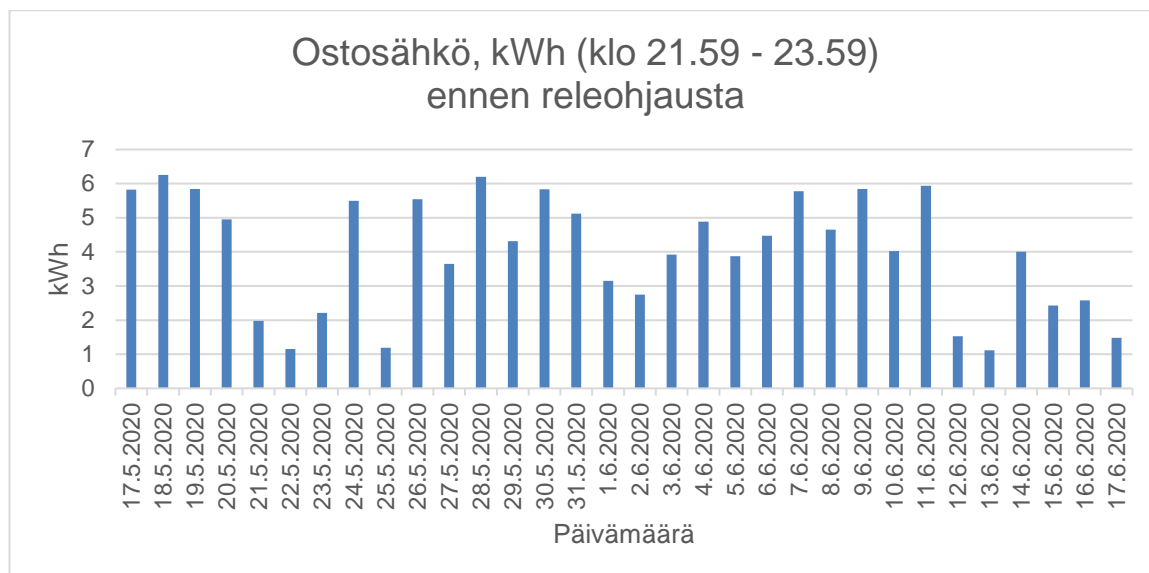
- 12 Fronius Ohmpilot. Verkkoaineisto. <<https://www.fronius.com/en/photovoltaics/products/all-products/solutions/fronius-solution-for-heat-generation/fronius-ohmpilot/fronius-ohmpilot>>. Luettu 28.8.2020.
- 13 Zappi v2 manual. Verkkoaineisto. Myenergi. <<https://myenergi.com/product/zappi/>>. Päivitetty toukokuussa 2020. Luettu 10.8.2020.
- 14 Zappi. Verkkoaineisto. Myenergi. <<https://myenergi.com/product/zappi/>>. Luettu 30.7.2020.
- 15 Kangasmaa, Linda. Tuoteasiantuntija, Helen Oy. Keskustelu 17.9.2020.
- 16 Ylijäämäsähkön myynti. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaama-sahkon_myynti>. Päivitetty 5.8.2020. Luettu 28.8.2020.
- 17 Ominaislämpökapasiteetti. Verkkoaineisto. Peda.net. <<https://peda.net/kotka/perusopetus/kotkansaaren-koulu/kt/oppiaineet/fysiikka/jannen-ryhmat/l%C3%A4mp%C3%B6l%C3%A4mp%C3%B6energia/o2>>. Luettu 3.9.2020.
- 18 Teho- ja energiayksiköt. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ajankoh-taista/energiasanasto_ja_-_yksikot/teho-_ja_energiayksikot>. Päivitetty 26.8.2019. Luettu 3.9.2020.
- 19 Asumisen energiankulutus. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <https://www.stat.fi/til/asen/2018/asen_2018_2019-11-21_kuv_002_fi.html>. Päivitetty 21.11.2019. Luettu 30.7.2020.
- 20 Legionellabakteerit vesijärjestelmissä. Verkkoaineisto. Terveystieteiden tutkimuskeskus ja Hyvinvoinnin Laitos. <<https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa>>. Päivitetty 22.6.2020. Luettu 30.7.2020.
- 21 Ajoneuvokanta kasvoi vuonna 2019. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <https://www.stat.fi/til/mkan/2019/mkan_2019_2020-02-28_tie_001_fi.html>. Päivitetty 28.2.2020. Luettu 30.7.2020.
- 22 Liikennekäytössä olevat sähköautot. Verkkoaineisto. Autoalan tiedotuskeskus. <http://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys>. Luettu 30.7.2020.
- 23 Sähköajoneuvojen lataussuositus 2019. Verkkoaineisto. SESKO ry. <https://www.sesko.fi/files/1098/Lataussuositus_2019_2019-05-27.pdf>. Luettu 6.8.2020.

- 24 Maalämpöpumput (MLP). Verkkoaineisto. Suomen lämpöpumppuyhdistys. <<https://www.sulpu.fi/maalampopumppu>>. Luettu 2.9.2020.
- 25 Härkönen, Martti. 2017. Lämpöpumpun toimintaperiaate. Verkkoaineisto. DIGMA Avoin oppimisympäristö. <<https://www.youtube.com/watch?v=HnPLpPbggtA>>. Luettu 6.8.2020.
- 26 Lämmönlähteet. Verkkoaineisto. Ympäristöosaava.fi. <<https://www.ymparistosaava.fi/kiinteistonhoitoala/index.php?k=22532>>. Luettu 30.7.2020.
- 27 Maaviileä. Verkkoaineisto. Tom Allen Senera. <<https://www.tomallensenera.fi/maalampo/maaviilea>>. Luettu 6.8.2020.
- 28 Ilmalämpöpumppu tukilämmityslähteenä. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologiat/ilmalampopumppu_tukilammityslahteenä>. Päivitetty 6.8.2020. Luettu 28.8.2020.
- 29 Ilmalämpöpumpun hyödyt. Verkkoaineisto. Vattenfall. <<https://www.vattenfall.fi/ilmalampopumppu/ilmalampopumpun-hyodyt/>>. Luettu 6.8.2020.
- 30 Toshiba Premium -ilmalämpöpumppu. Verkkoaineisto. Toshiba. <<https://www.toshibasuomi.fi/tuotteet/ilmalampopumput/toshiba-premium/>>. Luettu 30.7.2020.
- 31 Lämpöpumpputilasto. Verkkoaineisto. Suomen lämpöpumppuyhdistys. <<https://www.sulpu.fi/documents/184029/0/La%CC%88mpo%CC%88pumpputilasto%202019%2C%20%20kuvaajat%20FI.pdf>>. Luettu 28.8.2020.
- 32 Ilmalämpöpumpulla jäähdyttäminen ei maksa paljon: "Kesäiseen jäähdyttämiseen kuluu vain joitakin euroja". Verkkoaineisto. Rakennusmaailma. <<https://rakennusmaailma.fi/ilmalampopumpulla-jaahdyttaminen-ei-maksa-paljonkesaiseen-jaahdyttamiseen-kuluu-vain-joitakin-euroja/>>. Luettu 6.8.2020.
- 33 Onko ilmalämpöpumpulla jäähdyttäminen kallista ja sähköntuhlausta? Verkkoaineisto. Vattenfall. <<https://www.vattenfall.fi/energianeuvonta/alykkaasti-kotona-ilmalampopumpulla-jaahdyttaminen/>>. Luettu 6.8.2020.
- 34 Powerwall. Verkkoaineisto. Tesla. <https://www.tesla.com/fi_FI/powerwall>. Luettu 6.8.2020.
- 35 EatonVideos. 2018. Verkkoaineisto. EatonVideos. <<https://www.youtube.com/watch?v=g05gHbZsn-k>>. Luettu 1.9.2020.

- 36 Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin. Verkkoaineisto. Tilastokeskus. <http://www.stat.fi/til/ehi/2020/01/ehi_2020_01_2020-06-11_kuv_005_fi.html>. Luettu 6.8.2020.
- 37 Aurinkolämpöjärjestelmien mitoitus. Verkkoaineisto. Motiva Oy. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/hankinta_ja_asennus/aurinkolampojarjestelman_mitoitus>. Päivitetty 5.8.2020. Luettu 6.8.2020.
- 38 Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q1/2020. Verkkoaineisto. Teknologiateollisuus. <<https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/inline-files/S%C3%A4hk%C3%B6inen%20liikenne%20tilannekatsaus%202020%20Q1%202020%2005%2011%20jaettava.pdf>>. Päivitetty 11.5.2020. Luettu 6.8.2020.
- 39 Tesla Model 3 Standard Range. Verkkoaineisto. Electric Vehicle Database. <<https://ev-database.org/car/1060/Tesla-Model-3-Standard-Range>>. Luettu 6.8.2020.
- 40 Henkilöliikennetutkimus 2016. Verkkoaineisto. Liikennevirasto. <https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lti_2018-01_henkiloliikennetutkimus_2016_web.pdf>. Luettu 31.8.2020.
- 41 Sähköntuotannon CO₂-päästöarvio. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/co2/>>. Luettu 6.8.2020.
- 42 Jaatinen, Krista. Tuoteryhmäpäällikkö, Helen Oy. Keskustelu. 11.9.2020.

Ensimmäinen tarkastelukohde - ostosähkön kulutus seurantavälillä

Ensimmäisen tarkastelukohteen ostosähkön kulutus kuukauden seuranta-ajalta sekä ennen releen asennusta että sen jälkeen. Kohteessa tarkasteltiin ilta-ajan ostosähkön kulutusta, sillä kohteen lämminvesivaraaja hyödynsi aikaisemmin kello kymmenen alkaen yösähköä. Havaittavissa on selkeä muutos ostosähkön määrässä.



Ensimmäinen tarkastelukohde - ostosähkön kulutus seurantavälillä

Ensimmäisen tarkastelukohteen kuvaajien arvot taulukoituna. Taulukoiden päätteessä keskiarvot seurantaväleille. Pudotus keskiarvossa viittaa releen toimivuuteen.

Ennen nykyistä releohjausta		Releohjaus toiminnassa	
Päivämäärä	Ostosähkö, kWh (klo 21.59 - 23.59)	Päivämäärä	Ostosähkö, kWh (klo 21.59 - 23.59)
17.5.2020	5,82	27.7.2020	0,59
18.5.2020	6,26	28.7.2020	0,59
19.5.2020	5,84	29.7.2020	0,76
20.5.2020	4,95	30.7.2020	0,25
21.5.2020	1,98	31.7.2020	0,25
22.5.2020	1,15	1.8.2020	1,39
23.5.2020	2,21	2.8.2020	0,65
24.5.2020	5,5	3.8.2020	0,34
25.5.2020	1,19	4.8.2020	0,33
26.5.2020	5,54	5.8.2020	0,38
27.5.2020	3,65	6.8.2020	0,52
28.5.2020	6,2	7.8.2020	0,41
29.5.2020	4,31	8.8.2020	3,51
30.5.2020	5,83	9.8.2020	0,34
31.5.2020	5,12	10.8.2020	0,87
1.6.2020	3,15	11.8.2020	0,4
2.6.2020	2,75	12.8.2020	0,3
3.6.2020	3,92	13.8.2020	0,3
4.6.2020	4,89	14.8.2020	0,52
5.6.2020	3,87	15.8.2020	0,34
6.6.2020	4,47	16.8.2020	0,33
7.6.2020	5,78	17.8.2020	0,31
8.6.2020	4,65	18.8.2020	0,29
9.6.2020	5,84	19.8.2020	0,24
10.6.2020	4,02	20.8.2020	0,32
11.6.2020	5,94	21.8.2020	0,41
12.6.2020	1,53	22.8.2020	0,48
13.6.2020	1,11	23.8.2020	1,47
14.6.2020	4	24.8.2020	0,24
15.6.2020	2,43	25.8.2020	0,33
16.6.2020	2,58	26.8.2020	0,35
17.6.2020	1,48	27.8.2020	0,33
Keskiarvo	4,00	28.8.2020	0,44
		29.8.2020	0,67
		Keskiarvo	0,57

Toinen tarkastelukohde - ostosähkön kulutus seurantavälillä

Tapahtunut ostosähkön määrä ilta-aikaan releohjauksen ollessa toiminnassa. Taulukon päätteinä keskiarvot. Oranssilla korostettu kulutuspiikit, jotka ovat poikkeuksellisen korkeita lukemia seurantavälillä. Kyseiset korkeat kulutuspiikit nostavat keskiarvoa huomattavasti. Kulutuspiikkien alkuperä ei ole tunnettu. Kulutuspiikit kuitenkin selkeästi poikkeavia, jolloin muiden päivien kulutuslukemat tärkeämpiä.

Päivämäärä	Ostosähkö, kWh (klo 21.59 - 23.59)
1.7.2020	0,68
2.7.2020	9,9
3.7.2020	0,89
4.7.2020	8,15
5.7.2020	0,85
6.7.2020	8
7.7.2020	0,55
8.7.2020	2,63
9.7.2020	0,49
10.7.2020	6,84
11.7.2020	0,62
12.7.2020	0,85
13.7.2020	0,86
14.7.2020	0,56
15.7.2020	4,41
16.7.2020	0,7
17.7.2020	0,48
18.7.2020	0,51
19.7.2020	0,76
20.7.2020	0,84
21.7.2020	0,82
22.7.2020	0,82
23.7.2020	0,86
24.7.2020	9,86
25.7.2020	0,71
26.7.2020	0,96
27.7.2020	0,57
28.7.2020	0,81
29.7.2020	1,07
30.7.2020	0,82
31.7.2020	1,22
Keskiarvo	2,20

Päivämäärä	Ostosähkö, kWh (klo 21.59 - 23.59)
1.8.2020	0,8
2.8.2020	0,91
3.8.2020	0,71
4.8.2020	0,84
5.8.2020	0,78
6.8.2020	9,57
7.8.2020	0,48
8.8.2020	0,5
9.8.2020	0,83
10.8.2020	0,72
11.8.2020	1,04
12.8.2020	10,46
13.8.2020	0,83
14.8.2020	0,82
15.8.2020	1,26
16.8.2020	0,93
17.8.2020	0,85
18.8.2020	0,92
19.8.2020	11,9
20.8.2020	0,86
Keskiarvo	2,30