Tampereen ammattikorkeakoulu

Vakioratkaisut kuormanohjaukseen kiinteistön aurinkosähköjärjestelmässä

Teemu Laiho

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2023

Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähköinen talotekniikka

LAIHO, TEEMU:
Vakioratkaisut kuormanohjaukseen kiinteistön aurinkosähköjärjestelmässä

Opinnäytetyö 36 sivua
Toukokuu 2023

Aurinkosähköjärjestelmien suosio on jatkuvassa kasvussa, ja asennettujen järjestelmien määrä on kasvanut eksponentiaalisesti viime vuosikymmenten aikana. Yhtenä hidasteena aurinkosähköjärjestelmien tuotannon täysimittaiseen hyödyntämiseen Suomessa on investoinnin kannattavuuteen merkittävästi vaikuttava itse tuotetun sähköenergian omakäyttöaste. Omatuotannon ja kiinteistön sähköenergian kulutuksen eriaikaisuus vähentää aurinkosähköjärjestelmästä saatavaa taloudellista hyötyä ja laskee investoinnin kannattavuutta.

Opinnäytetyössä vertailtiin erityyppisten kiinteistöjen vuosikulutusta aurinkosähköjärjestelmän vuosituotantoon ja selvitettiin, minkä tyyppiset kiinteistöt hyödyntävät itsetuotettua sähköenergiaa tehokkaimmin. Lisäksi havainnollistettiin kuormanohjaukseen potentiaalisimpien sähkölaitteiden sähkönkulutusta tuotannon parhaaksi hyödyntämiseksi. Lopuksi selvitettiin, millaisia vakioratkaisuja markkinoilta löytyy aurinkosähköjärjestelmän tuotannon mukaiseen kuormanohjaukseen kiinteistössä omakäyttöasteen parantamiseksi. Myös muita tapoja hyödyntää aurinkosähkön tuotannon pohdittiin investoinnin kannattavuuden parantamiseksi. Opinnäytetyö tehtiin Rejlers Rakentaminen Oy:lle.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin aurinkosähköjärjestelmiä yleisesti ja niiden tuotantoon vaikuttavia tekijöitä. Erityyppisten kiinteistöjen vertailuun hyödynnettiin olemassa olevaa tyyppikiinteistödataa. Tuotetun energian hyödyntämiseksi pohdittiin potentiaalisimpien sähkölaitteiden ohjaustapoja. Vakioratkaisuja kuormanohjaukseen selvitettiin haastattelemalla aurinkosähköjärjestelmätoimittajien sekä sähkökeskusvalmistajien edustajia.

Työn tuloksena saatiin neljästä tyyppikiinteistöstä parhaiten omatuotantoa hyödyntävä kiinteistötyyppi sekä kaksi potentiaalista aurinkosähköjärjestelmän tuotannon mukaista kuormanohjausta käyttävää sähkökuormaa. Haastatelluilla yrityksillä ei ollut markkinoilla vakioratkaisuja tuotannon mukaiseen kuormanohjaukseen, mutta aihe on ajankohtainen ja tulevaisuudessa kehittyvä.

Asiasanat: aurinkosähkö, energiantuotanto, energiankulutus, kuormanohjaus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Building Services Engineering
Electrical Systems

LAIHO TEEMU:
Standard Solutions for Load Control in the Solar Power System of a Building

Bachelor's thesis 36 pages
May 2023

Solar power and solar panels producing electricity have enormous potential. One reason why they are not fully exploited yet is the difference between production and consumption periods. Production is at the highest during noon in summer and consumption is at the highest typically during morning and afternoon in winter.

The purpose of this thesis was to find out what kind of standard solutions there are for controlling electric loads according to solar power production. First, a comparison of the load profiles of different types of buildings was conducted, followed by a comparison of the load profiles of some electrical appliances that could potentially be controlled. After this, switchboard manufacturers and a supplier of solar power systems were interviewed about which kinds of standard solutions there might be to maximize the use of the electricity produced by the solar panels. This thesis was commissioned by Rejlers Rakentaminen Oy.

The theoretical section explores earlier studies about solar power systems and electrical loads and profiles. Switchboard and solar power system professionals were interviewed about standard solutions for load control in solar power systems on the market and about other ways of improving their profitability.

In conclusion, one type of building exploits solar power production better than others and there are not many electrical loads to exploit for improving the usage of electricity produced by solar panels. The solutions discovered were mainly charging stations or heat pumps connected to solar power system, and some products at the stage of development.

Key words: solar power, production, consumption, power control

SISÄLLYS

1 JOHDANTO 5
2 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ 7
2.1 Toiminta ja komponentit 7
2.2 Tuotantoon vaikuttavat tekijät 9
2.2.1 Paneelien suuntaus ja kallistuskulma 9
2.2.2 Ympäristön olosuhteet 12
2.3 Käytön optimointi 13
3 KIINTEISTÖT JA SÄHKÖKUORMAT 15
3.1 Kiinteistöjen kuormitusprofiilit 15
3.1.1 Kerrostalohuoneisto 17
3.1.2 Pientalo, suora sähkölämmitys 19
3.1.3 Teollisuus, 1-vuoro 21
3.1.4 Liike-elämä, auki viikonloppuisin 23
3.2 Potentiaaliset kuormat 25
3.2.1 Lämminvesivaraaja 26
3.2.2 Sähköauton latausasema 27
4 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN KUORMANOHJAUS 29
4.1 Markkinoilta löytyvät ratkaisut 29
4.2 Kehitys ja muut mahdollisuudet 30
5 TULOKSET 32
6 POHDINTA 33
LÄHTEET 34

1 JOHDANTO

Vuonna 2022 alkanut energiakriisi sekä käynnissä oleva energiamurros ovat kasvattaneet kiinnostusta energian omatuotantoon, kuten aurinkosähköjärjestelmiin. Kiinteistöjen yleisin omatuotantotapa on aurinkoenergian hyödyntäminen katolle asennettavalla aurinkosähköjärjestelmällä. Valtioneuvoston kanslian tilaaman selvityksen mukaan aurinkosähkön teoreettinen tuotantopotentiaali rakennusten katoilla Suomessa on yli 14 GW, mikä on lähes yhtä paljon kuin Suomen voimalaitoskapasiteetti yhteensä, ja pelkästään kattopinta-alojen mahdollistaman kapasiteetin mukainen aurinkoenergian tuotanto kattaisi noin 14 % vuoden 2030 arvioidusta loppukulutuksesta (Valtioneuvoston kanslia 2017, 11). Potentiaalia aurinkosähkön tuotannolle Suomessa on täten riittävästi. Energiateollisuus ry:n (2022) Energiavuosi 2022 Sähkö -julkaisun mukaan aurinkosähkön osuus Suomen sähköenergian tuotannosta oli kuitenkin vain 0,5 %.

Kiinteistön aurinkosähköjärjestelmien mitoituksen lähtökohtana on usein tuotetun energian hyödyntäminen kiinteistön omaan käyttöön tai käytössä oleva asennuspinta-ala. Olemassa olevasta kiinteistöstä on yleensä saatavilla sähköenergian mittaustiedot, joiden avulla saadaan selville kohteen pohjakulutus. Tämän pohjakulutuksen perusteella saatu sähkölaitteiston jatkuva teho on usein se, mikä määrittää aurinkosähköjärjestelmän koon, vaikka asennuspinta-alaa olisi enemmänkin tarjolla. (Motiva 2022a.) Tämän ylimääräisen asennuspinta-alan hyödyntäminen ei yleensä ole kiinteistön omistajalle kannattava sijoitus, koska suurin taloudellinen hyöty kiinteistössä tuotetusta aurinkosähköstä saadaan, kun tuotettu sähkö käytetään itse kiinteistössä sen sijaan, että se myytäisiin sähköverkkoon.

Kuten kuvassa 1 on havainnollistettu, hyödyntämällä kiinteistössä tuotettu sähkö itse, säästetään sähkön ostamisen lisäksi sähkönsiirrosta ja veroista. Kun sähköä myydään verkkoon, saadaan sähköstä vain myyntihetken mukainen markkinahinta. (Motiva 2022b.) Uusiutuvan energian kokonaistuotannon kannalta järkevintä olisi kuitenkin käyttää kaikki mahdollinen pinta-ala auringon valtavan energiamäärän hyödyntämiseksi.

KUVA 1. Itse tuotetun sähkön käytön ja myynnin hyödyn vertailu. (Motiva 2022b)

Opinnäytetyö tehdään Rejlers Rakentaminen Oy:lle, ja sen tarkoituksena on selvittää uusia ratkaisuja asiakkaille suunniteltavien aurinkosähköjärjestelmien tehokkaampaan hyödyntämiseen. Tässä opinnäytetyössä selvitetään millaiset kiinteistöt hyödyntävät aurinkosähköjärjestelmällä tuotettua sähköenergiaa parhaiten, ja mitkä ovat kiinteistön potentiaalisimpia aurinkosähköä hyödyntäviä sähkökuormia. Työssä selvitetään myös millaisia vakioratkaisuja sähkökeskusten ja aurinkosähköjärjestelmien valmistajilla on erilaisten sähkökuormien hallintaan. Tavoitteena on löytää yksinkertaisia ja valmiita ratkaisuja kiinteistöihin, suoraan tuotannon ja kulutuskohteen välille.

Työn teoriaosuudessa käsitellään yleisesti aurinkosähköjärjestelmiä, miten ne toimivat ja millaisia komponentteja ja laitteita niihin liittyy. Tämän jälkeen tarkastellaan mitkä tekijät vaikuttavat aurinkosähköjärjestelmien tuotantoon, ja miten näihin voidaan vaikuttaa. Lopuksi pohditaan, miten aurinkosähkön käytön optimointia voitaisiin teoriassa toteuttaa.

Tutkimusosuudessa selvitetään erilaisten kiinteistöjen ja laitteiden kuormitusprofiileja, ja potentiaalisesti ohjattavia kuormia, joita voidaan hyödyntää aurinkosähköjärjestelmän tuotannon mukaiseen kuormanohjaukseen. Lopuksi haastatellaan sähkökeskusten valmistajia ja aurinkosähköjärjestelmien toimittajia. Haastattelujen tarkoituksena on selvittää, millaisia vakioratkaisuja, tuotteita tai ideoita aurinkosähkön käytön optimoimiseen markkinoilta löytyy.

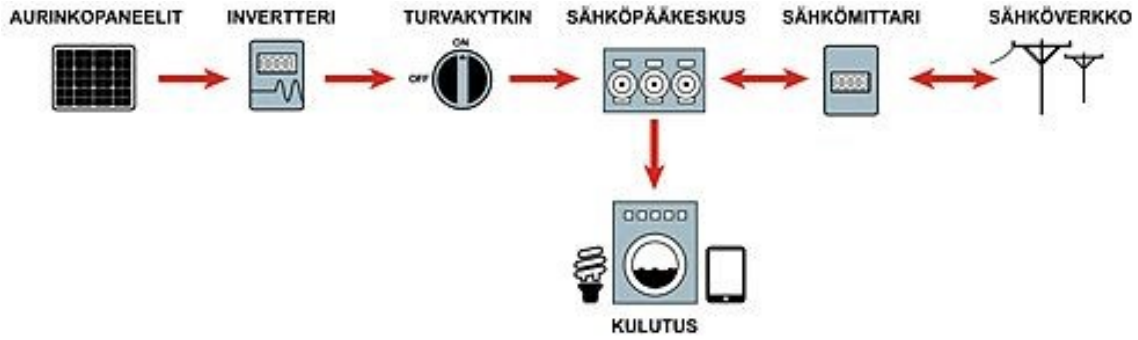
2 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMÄ

Auringosta säteilevän energian huomattavaa määrää kuvaa jo pelkästään maanpinnalle osuva 170 000 TW säteilyteho (Energiateollisuus ry n.d.). Aurinkosähköjärjestelmä hyödyntää auringon säteilyenergiaa, josta Suomeen saatava säteilyenergia vaakasuoralle pinnalle on sijainnista riippuen Ilmatieteen laitoksen mukaan 790–900 kWh/m^2 (Motiva 2022c). Uusinta tekniikkaa käyttävillä aurinkopaneeleilla auringon säteilyenergiasta voidaan hyödyntää sähköntuotantoon hieman yli 20 %, tulevaisuudessa jopa 30 % (Jalli 2022).

2.1 Toiminta ja komponentit

Aurinkosähköjärjestelmän toiminta perustuu auringon säteilyn ja aurinkokennojen puolijohdemateriaalin, yleensä piin, väliseen valosähköiseen ilmiöön, jossa auringon säteily synnyttää puolijohteen eri puolille jännitteen. Aurinkokennojen määrää ja kytkentätapoja muuttamalla saadaan haluttu jännite. Auringonsäteilyn voimakkuus taas vaikuttaa tuotettuun virtaan. Sarjaan- ja rinnankytketyistä aurinkokennoista muodostuu aurinkopaneeli. (Energiateollisuus ry n.d.)

Aurinkosähköjärjestelmä muodostuu yleensä katolle tai julkisivuun asennettavista aurinkopaneeleista, joiden lukumäärä ja tyyppi määräävät järjestelmän huipputehon. Aurinkopaneelit kiinnitetään asennusalustaan siihen tarkoitetuilla kiinnikkeillä tai kehikoilla. Aurinkopaneelien tuottama sähkö johdetaan verkkoon kytketyissä järjestelmissä joko suoraan, kuten kuvassa 2, tai paneelien tuottamaa tasavirtaa optimoivan säätimen kautta invertteriin eli vaihtosuuntaajaan, joka muuntaa tasavirran sähköverkkoon sopivaksi vaihtovirraksi. Invertteristä sähköenergia syötetään verkosta erottamiseen tarkoitetun turvakytkimen kautta yleensä sähkökeskukseen. Sähkökeskuksessa aurinkopaneeleilla tuotettua sähköenergiaa voidaan mitata omalla mittarilla. Verkkoyhtiön mittarilla mitataan verkosta otettua ja sinne syötettyä sähköenergiaa, toisin sanoen sillä mitataan kulutetun ja kiinteistössä tuotetun energian erotusta. (Motiva 2022d, 2022e, 2022f.)



KUVA 2. Verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän kokoonpano (Motiva 2022e)

Aurinkosähköjärjestelmä voidaan kytkeä sähköverkkoon 1- tai 3-vaiheisena. Vaiheiden lukumäärä riippuu käytettävästä invertteristä, jonka taas määrittää usein järjestelmän teho. Alle 3 kW järjestelmissä invertterit ovat pääsääntöisesti 1-vaiheisia, ja sitä suurempitehoisissa 3-vaiheisia. Epäsymmetriaa verkkoon aiheuttavan yksivaiheisen invertterin soveltuvuus kohteeseen on hyvä tarkistaa alueen verkkoyhtiöltä. (ST-käsikirja 40 2021, 49.)

Yhteen vaiheeseen kytketyissä järjestelmissä tuotettu sähkö voidaan hyödyntää vain samaan vaiheeseen kytketyissä kuormissa. Tällöin tuotettua sähköenergiaa ei välttämättä hyödynnetä itse, vaan se myydään verkkoon, vaikka toisessa vaiheessa olisikin sähkökuormaa, johon tuotettu energia voidaan hyödyntää. Kolmeen vaiheeseen kytketty aurinkosähköjärjestelmä syöttää tuotettua sähköenergiaa kiinteistön sähköjärjestelmän jokaiseen vaiheeseen, jolloin tuotettu energia hyödynnetään kaikkiin päällä oleviin laitteisiin. Myös 3-vaiheisissa järjestelmissä vaiheiden kuormitus voi olla epätasaista, jolloin osa tuotetusta sähköenergiasta siirretään verkkoon. (Motiva 2022e.)

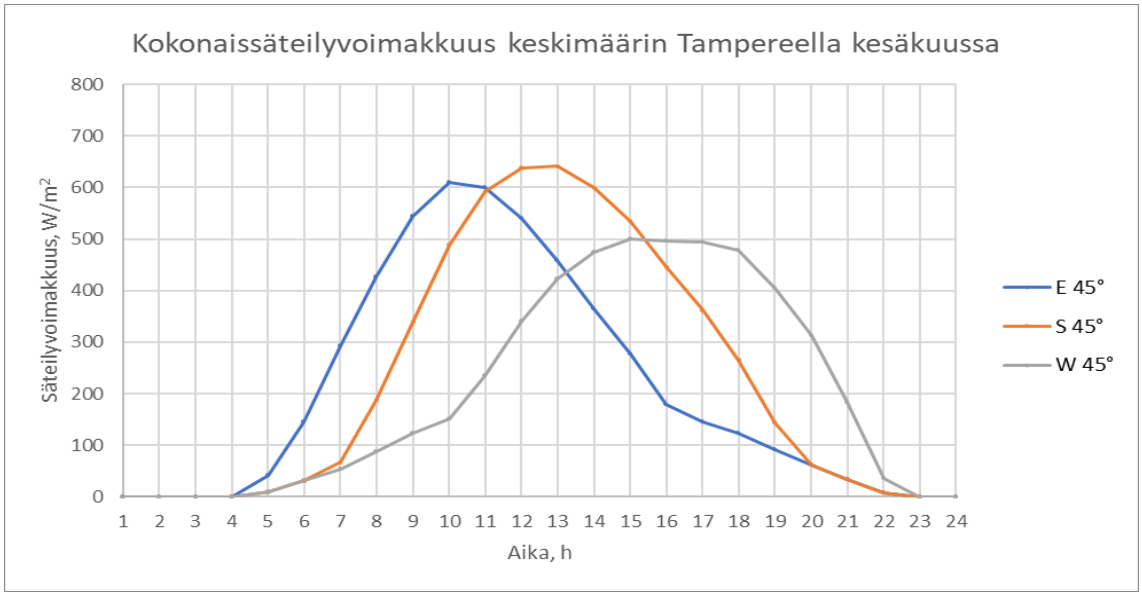
Samanaikaisesti yhdestä vaiheesta verkkoon myytävä ja toisesta vaiheesta verkosta ostettava sähköenergia pitää nykyään Valtioneuvoston asetuksen mukaisesti netottaa taseselvityksellä. Taseselvityksessä summataan verkkoon myyty ja verkosta ostettu sähköenergia, jolloin yhden taseselvitysjakson aikana on sähköenergiaa vain joko ostettu tai myyty. Taseselvityksen vaihenetotus tapahtuu sähkökaupan keskitetyssä tiedonvaihdon yksikössä, kantaverkkoyhtiön ylläpitämässä Datahubissa. (Valtioneuvoston asetus 767/2021.) Netotuksen ansiosta 1-vaiheisen aurinkosähköjärjestelmän tuottama, mutta verkkoon syötettävä sähköenergia voidaan hyödyntää muissa vaiheissa Datahubin laskennan avulla.

2.2 Tuotantoon vaikuttavat tekijät

Suurimpina tekijöinä tuotantoon vaikuttavat aurinkosähköjärjestelmän koko ja sijainti. Olemassa olevan kiinteistön sijaintiin on hankala vaikuttaa, ja kokoa usein rajoittavat käytettävissä oleva asennuspinta-ala tai investoinnin budjetti. Seuraavaksi perehdytään mitkä tekijät edellä mainittujen lisäksi vaikuttavat aurinkosähköjärjestelmän tuotantoon.

2.2.1 Paneelien suuntaus ja kallistuskulma

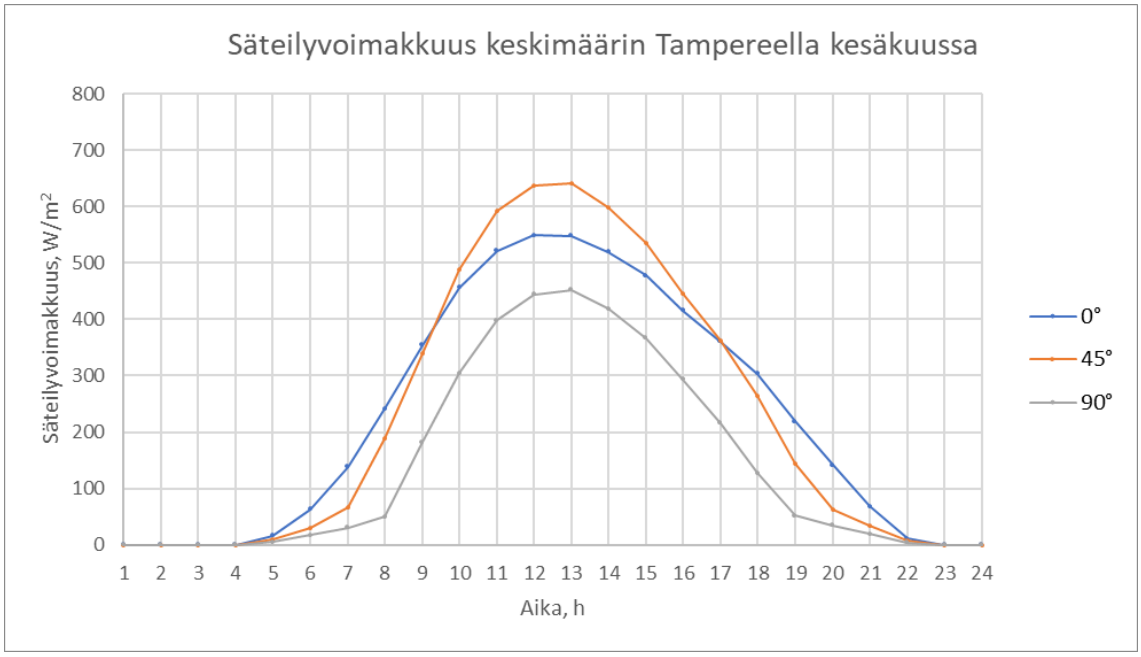
Atsimuutilla eli suuntauksella tai suuntauskulmalla tarkoitetaan aurinkopaneelin pinnan astepoikkeamaa etelästä, jolloin etelä ilmoitetaan suuntauskulmalla 0°, itä suuntauskulmalla -90° ja länsi suuntauskulmalla +90° (ST-käsikirja 40 2021, 19). Aurinkopaneelien suuntauksella on suuri vaikutus niiden tuotantoon. Etelään suunnatuilla paneeleilla saadaan suurin vuosituotto, mutta sähkönkulutuksen painottuessa enemmän aamu- tai iltapäivään, voi paneelien suuntaaminen itään tai länteen olla myös perusteltua, jotta tuotettu energia saadaan hyödynnettyä parhaiten itse. Usein suunnan määrää kuitenkin rakennuksen tai asennusalustan suunta. (Motiva 2022g.) Kuviossa 1 on havainnollistettu aurinkoenergian säteilyvoimakkuutta kesäkuussa Tampereella itään, etelään ja länteen suunnatuille, 45 asteen kallistuskulmalle asennetuille pinnoille.



KUVIO 1. Suuntauksen vaikutus kokonaissäteilyvoimakkuuteen (PVGIS 2022)

Kuviosta nähdään, miten pintoihin osuva säteily painottuu eri aikoihin suunnasta riippuen. Säteilyvoimakkuus on etelään suunnatulla pinnalla suurinta. Itään suunnatulla pinnalla säteilyvoimakkuus lähtee nousemaan noin kaksi tuntia aikaisemmin kuin etelään suunnatulla pinnalla. Länteen suunnatun pinnan säteilyvoimakkuus pysyy iltapäivällä pidempään lähellä huipputasoa.

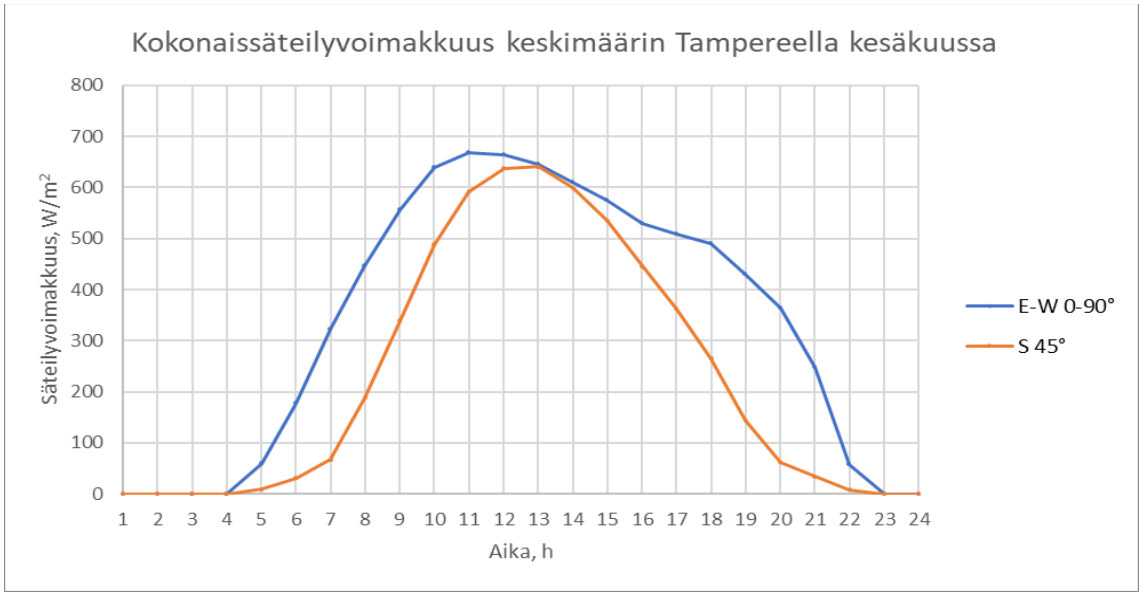
Kallistus eli kallistuskulma kertoo aurinkopaneelien astekulman suhteessa horisonttiin, eli vaakasuoraan makaavat paneelit ovat kallistuskulmassa 0° ja pystyssä olevat kallistuskulmassa 90° (ST-käsikirja 40 2021, 19). Paneelien kallistuskulmalla on myös suuri merkitys niiden tuotantoon. Paras tuotanto saadaan noin 45 asteen kulmalla. Kuten ilmansuunnallakin, kallistuskulmalla voidaan vaikuttaa aurinkopaneelien vuosituotantoprofiiliin. Lähes vaakasuoralla asennuksella saavutetaan keskikesällä suurin huipputeho, kun taas pystysuoralla asennuksella saadaan tasaisin tuotto keväästä syksyyn. Kulutuksen perusteella olisi järkevää pohtia mikä on kannattavin kallistuskulma. Paneelien kallistuskulman määrää usein asennusalustan eli katon tai julkisivun kulma, mutta kiinnitysjärjestelmiä ja telineitä on monenlaisiin sovelluksiin. (Motiva 2022g.) Kuviossa 2 on havainnollistettu säteilyvoimakkuutta vuorokauden aikana Tampereella kesäkuussa etelän suuntaan asennetuille pinnoille 0, 45 ja 90 asteen kallistuskulmissa.



KUVIO 2. Kallistuksen vaikutus kokonaissäteilyvoimakkuuteen (PVGIS 2022)

Kuviosta nähdään, että 45 asteen kallistuskulmalla on korkein säteilyvoimakkuus keskipäivällä, mutta vaakapinnalle säteilyvoimakkuus on suurempaa aamun ensimmäisinä ja illan viimeisinä tunteina. Tätä aamun ja illan paremman tuotannon antavaa kallistuskulmaa kannattaa harkita kohteissa, jossa kulutus on aamu ja iltapäivällä suurempaa ja keskipäivällä huomattavasti vähäisempää.

Aurinkopaneelien tuotantoa voidaan kiinteään asennukseen verrattuna jopa kaksinkertaistaa aurinkoa seuraavalla asennuksella. Aurinkoa voidaan seurata yhden tai kahden akselin liikkeellä. Yhdellä akselilla voidaan seurata aurinkoa pysty- tai vaakasuunnassa. Kahden akselin avulla aurinkoa voidaan seurata pysty- ja vaakasuunnassa, jolloin paneelit ovat aina optimikulmassa aurinkoon nähden. Aurinkoa seuraavat järjestelmät kuitenkin kasvattavat merkittävästi hankintakustannuksia, huoltotarvetta ja heikentävät toimintavarmuutta. (Motiva 2022g.) Kuviossa 3 on havainnollistettu aurinkoenergian säteilyvoimakkuutta kesäkuussa Tampereella etelään suunnatulle, 45 asteen kallistuskulmalle asennetulle pinnalle ja aurinkoa seuraavalle pinnalle.



KUVIO 3. Aurinkoa seuraavan asennuksen vaikutus kokonaissäteilyvoimakkuuteen (PVGIS 2022)

Kuviosta nähdään, että aurinkoa seuraavalle pinnalle säteilyvoimakkuus on selvästi pidemmän ajan vuorokaudesta korkeammalla tasolla kuin kiinteästi asennetulla pinnalla. Saatava hyöty on todennäköisesti melko vähäinen, kun ottaa huomioon aurinkoa seuraavan asennuksen kustannukset ja toimintavarmuuden.

2.2.2 Ympäristön olosuhteet

Aurinkopaneelien asennus suoraan esimerkiksi kattopintaan huonontaa niiden sähköntuotantoa, koska paneelien lämpötila nousee herkemmin, jolloin hyötysuhde huononee. Aurinkopaneelien ja asennusalustan väliin tulisi aina jättää tuuletusrako, joka varmistaa paneelien riittävän jäähdytyksen. Invertterin ja mahdollisen akuston sijoituksella voi ympäristön lämpötilan kautta olla myös merkitystä järjestelmän sähköenergian tuotantoon. (Motiva 2022h, 2022g.) Aurinkopaneelin tyyppi ratkaisee, miten lämpötila vaikuttaa paneelin tuotantoon, mutta teho heikkenee lämpötilan noustessa standardiolosuhteista yleensä noin 0,3–0,5 %/°C. Invertterit ja säätimet alkavat usein rajoittamaan toimintaansa lämpötilan nousun hillitsemiseksi jo paljon ennen varsinaisen toimintalämpötila-alueen ylärajaa. (ST-käsikirja 40 2021, 22–23, 119.)

Standardiolosuhteilla tarkoitetaan paneeliin osuvaa 1000 W/m^2 auringon säteilymäärää ja paneelin 25°C lämpötilaa. Standardiolosuhteissa 1 kW sähkötehon tuottavan aurinkosähköjärjestelmän nimellisteho on 1 kWp eli piikkikilowatti. Yhden piikkikilowatin aurinkosähköjärjestelmä vaatii tyypillisesti noin 5 m^2 asennuspinta-alan, paneelien hyötysuhteen ollessa noin 20 %. (Motiva 2022h.)

Aurinkosähkön tuotantoon suurimpana tekijänä vaikuttaa auringosta saatavan säteilyn määrä. Suomessa merkittävä osa kokonaissäteilystä on ilmakehästä, pilvistä ja maasta heijastuvaa hajasäteilyä. Paneelien kallistuskulmalla voidaan parantaa ympäristöstä kuten lumesta ja kiiltävistä pinnoista heijastuvan säteilyn hyödyntämistä. (Motiva 2022c.) Auringosta saa Suomessa energiaa kohtuullisesti myös talvella asentamalla aurinkopaneelit pystysuoraan esimerkiksi julkisivuun. Talvella aurinko paistaa erittäin matalalta eikä julkisivuun asennetut paneelit kerää lunta. Myös lumesta heijastuva säteily lisää tuotantoa kirkkaina talvipäivinä. (LUT-yliopisto 2022.)

Usein vähemmälle huomiolle jäävä tekijä on muun muassa puista ja muista rakennuksista aiheutuvat varjot. Jo suunnitteluvaiheessa olisi hyvä havainnoida mahdolliset varjostukset suunnitellulle asennusalustalle. (Motiva 2022g.) Paneelien päälle satava lumi sekä putoavat lehdet ja havut heikentävät paneelien tuo-

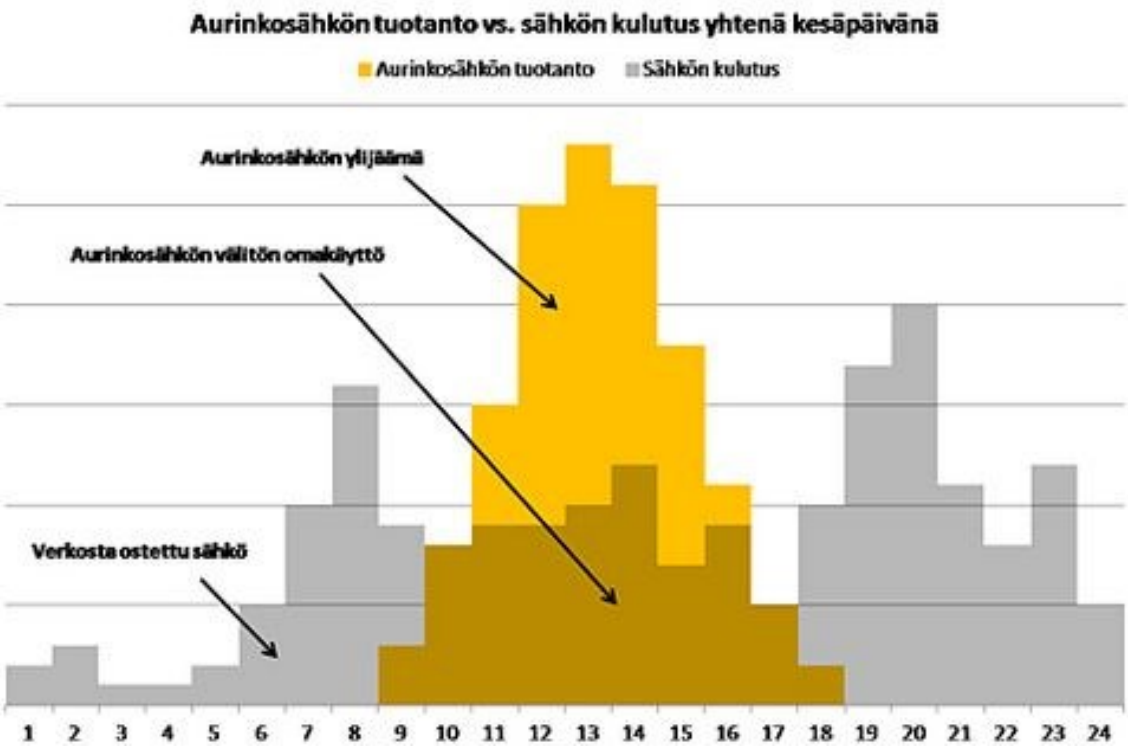
tantoa estämällä auringonsäteilyn. Ympäristön muuttuessa, puiden kasvun ja rakentamisen myötä, myös paneeleihin osuvat varjostukset saattavat lisääntyä ja heikentää tuotantoa myöhemmin. (Motiva 2022h.) Yhdeksi ketjuksi kytketyt paneelit voivat sisäisten kytkentöjen ja paneelien sarjaan ketjuttamisen takia jopa lakata kokonaan tuottamasta pelkästään yhden pienen varjon osuessa paneeliin (ST-käsikirja 40 2021, 21).

2.3 Käytön optimointi

Euroopan komission toukokuussa 2022 julkaistussa REPowerEU -suunnitelmassa tavoitellaan katolle asennettavien aurinkopaneelien velvoitetta uusiin julkisiin ja kaupallisiin rakennuksiin sekä asuinrakennuksiin (Euroopan komissio 2022). Tämä todennäköisesti lisäisi voimakkaasti aurinkosähköjärjestelmien määrää, ja pakottaisi sellaisen myös kiinteistöön, jossa se ei välttämättä ole kannattava, jolloin omatuotannon tehokkaampi hyödyntäminen itse korostuu entisestään.

Auringon paistaessa vain päivällä ja Suomessa enimmillään kesällä, keskittyy aurinkosähkön tuotanto pääasiassa näihin aikoihin. Ihanteellisin kohde aurinkosähkön hyödyntämiseen on kiinteistöt, joissa on suuri jäähdytystarve kesäpäivinä ja samanaikaisesti myös tarve esimerkiksi lämpimän käyttöveden tuottamiseen. Tällaisia ovat esimerkiksi kauppakiinteistöt. (Motiva 2022i.) Käytön optimointi keskittyy siis kulutuksen siirtämiseen vuorokauden sisällä, ei vuositasolla. Vaikka kulutuksen siirtäminen vuositasolla olisi ihanteellisinta, se on kuitenkin toistaiseksi mahdotonta tai taloudellisesti kannattamatonta.

Kuten jo aikaisemmin todettiin, kiinteistön käyttäjä hyötyy aurinkopaneeleilla tuotetusta sähköenergiasta eniten hyödyntäessään sen itse. Tuotantoa seuraamalla voi käyttäjä kytkeä sähkölaitteita päälle tuotannon ollessa korkealla hyödyntääkseen omatuotetun energian kiinteistön sisällä mahdollisimman tehokkaasti. Myös esimerkiksi lämpimän käyttöveden tuottamiseen tarkoitettu lämminvesivaraaja voidaan ohjata päälle tuotannon ollessa korkeimmillaan (Motiva 2022j.) Näin tehtäessä voidaan hyödyntää kuvassa 3 näkyvää keskipäivällä syntyvää tuotannon ylijäämää.



KUVA 3. Aurinkosähkön tuotannon ja kulutuksen jakautuminen (Motiva 2022k)

Lämminvesivaraajan lisäksi sähköauton lataaminen on potentiaalinen aurinkosähkön hyödyntämiskohde. Vaikka sähköautoa ei vielä olisi, on siihen varautuminen aurinkosähköjärjestelmän tehon ja mahdollisen kuormanohjauksen suunnittelussa järkevää. (Motiva 2022k.) Kotitalouksissa sähköautoa on hyvä ladata öisin, kun taas työpaikoilla, kuten toimistorakennuksissa ja kauppakiinteistöissä, lataus tapahtuu pääasiassa päivällä (Motiva 2022l). Tämä tekee kiinteistöistä, joissa asioidaan pääasiassa päivisin, potentiaalisimman aurinkosähköä ja kuorman ohjausta hyödyntävän kohteen.

3 KIINTEISTÖT JA SÄHKÖKUORMAT

Tässä luvussa tutkitaan erilaisten tyyppikiinteistöjen kulutuksia ja verrataan niitä aurinkosähköjärjestelmän tuotantoon vuositasolla. Lisäksi tarkastellaan potentiaalisimpien sähkölaitteiden ja -kuormien kulutusprofiileja ja aurinkosähköjärjestelmän tuotantoa vuorokaudessa. Pohditaan myös niiden käytettävyyttä ja miten ne soveltuvat tuotannon mukaiseen ohjaukseen.

3.1 Kiinteistöjen kuormitusprofiilit

Tässä alaluvussa vertaillaan erilaisten kiinteistöjen sähköenergian kulutuksen ja aurinkosähkön tuotannon yli- ja alijäämää. Kuvioissa 3–10 sinisellä ja keltaisella ilmaistaan sähköenergian kulutusta ja aurinkosähkön tuotantoa. Vihreällä ilmaistaan tuotannon ylijäämää eli sähköverkkoon myytävää sähköä, ja punaisella taas tuotannon alijäämää eli verkosta ostettavaa sähköä. Kiinteistöjen vuosikulutukset poikkeavat toisistaan, joten aurinkosähköjärjestelmän tehot ovat suhteutettu vuosikulutukseen, jotta ne olisivat paremmin vertailtavissa.

Työssä oli tarkoitus vertailla opinnäytetyön teettäjälle oleellisien kiinteistöjen sähköenergian kulutusprofiileja, mutta sellaisten kiinteistöjen mittaustietoja ei saatu käytettäväksi. Tästä syystä päädyttiin käyttämään Tampereen yliopiston (2019) Energiavirastolle tekemän tutkimusprojektin mittaustietoja, jossa luotiin 14 tyyppikäyttäjäryhmää. Tutkimuksessa hyödynnettiin erityyppisten kiinteistöjen sähköenergian tuntikulutustietoja vuodelta 2018. Näistä neljästätoista tyyppikäyttäjäryhmästä tähän vertailuun valittiin seuraavat neljä:

- Kerrostalohuoneisto, 2 500 kWh/a
- Pientalo, suora sähkölämmitys, 16 000 kWh/a
- Teollisuus, 1-vuoro, 180 000 kWh/a
- Liike-elämä, auki viikonloppuisin, 600 000 kWh/a

Excel taulukkolaskentaohjelmaa käyttäen vertailtiin näitä neljää kiinteistöä aurinkosähköjärjestelmän tuottaman sähkön hyödyntämisessä. Laskennassa käytettiin Euroopan komission PVGIS (2022) työkalulla saadun etelään suunnatun, 45°

kallistuskulmaan Tampereelle asennetun nimellisteholtaan 1 kWp aurinkosähköjärjestelmän tuntituotantotietoja. Järjestelmän tehoa kasvatettiin niin, että vuosituotanto kattaa puolet vertailtavan kiinteistön vuotuisesta sähköenergian tarpeesta. Jokaisen tunnin kulutuksen ja tuotannon erotukset summattiin tuotannon vuotuiseksi ylijäämäksi ja alijäämäksi. Suhteuttamalla ylijäämä tuotantoon saadaan järjestelmän omakäyttöaste, jolla voidaan vertailla minkä tyyppinen kiinteistö hyödyntää aurinkosähköjärjestelmällä itsetuotetun sähköenergian parhaiten. Mitä vähemmän ylijäämää on, sitä paremmin kiinteistö hyödyntää tuotetun energian. Kiinteistön ja aurinkosähköjärjestelmän vuotuinen omakäyttöaste *K* saadaan kaavalla

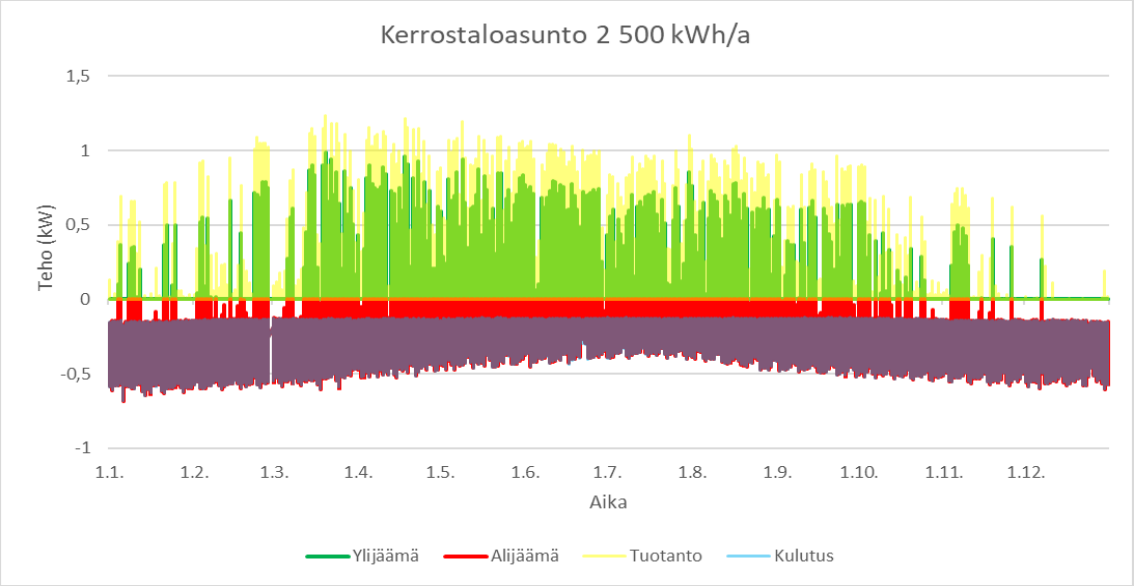
$$K = \sum_{t=1}^{t=8760} K(t) = \sum_{t=1}^{t=8760} \frac{E_K(t)}{E_T(t)} = \sum_{t=1}^{t=8760} \frac{E_T(t) - E_Y(t)}{E_T(t)}, \qquad (1)$$

jossa *t* on energian mittausjakso eli aika tunteina, *K(t)* on yhden tunnin omakäyttöaste ajanhetkellä *t*, $E_K(t)$ on omatuotannosta itse käytetty energia ajanhetkellä *t*, $E_T(t)$ on aurinkosähköjärjestelmällä tuotettu sähköenergia ajanhetkellä *t* ja $E_Y(t)$ on omatuotannon ylijäämä energia ajanhetkellä *t*. Ihanneolosuhteissa ja mitoituksella kiinteistön aurinkosähköjärjestelmällä tuotettu sähköenergia hyödynnetään kiinteistön sisällä, eikä yli- tai alijäämää synny. Tämä on kuitenkin lähes mahdotonta tuotannon ollessa yöllä nollissa ja talvella vähäistä.

Alaluvuissa 3.1.1–3.1.4 esitetyissä vuositason kuvioissa 3, 5, 7 ja 9 on käytetty sähköenergian kulutuksen ja tuotannon tuntikulutustietoja, joten vuositasolla tarkasteltuna näyttää kuin yli- ja alijäämä olisi osittain jatkuvaa ja samanaikaista. Tuntitason tarkastelussa näin ei kuitenkaan ole, joten vuositason kuvion jälkeen on kuvio, jossa havainnollistetaan, miten vuorokauden aikana tuotannon muuttuessa muuttuu myös yli- ja alijäämä. Eri kiinteistöjen alaluvuissa on käytetty eri vuodenaikojen vuorokausitarkastelussa havainnollistamaan miten tuotanto- ja kulutusprofiilit sekä yli- ja alijäämät muuttuvat myös vuodenajan mukaan.

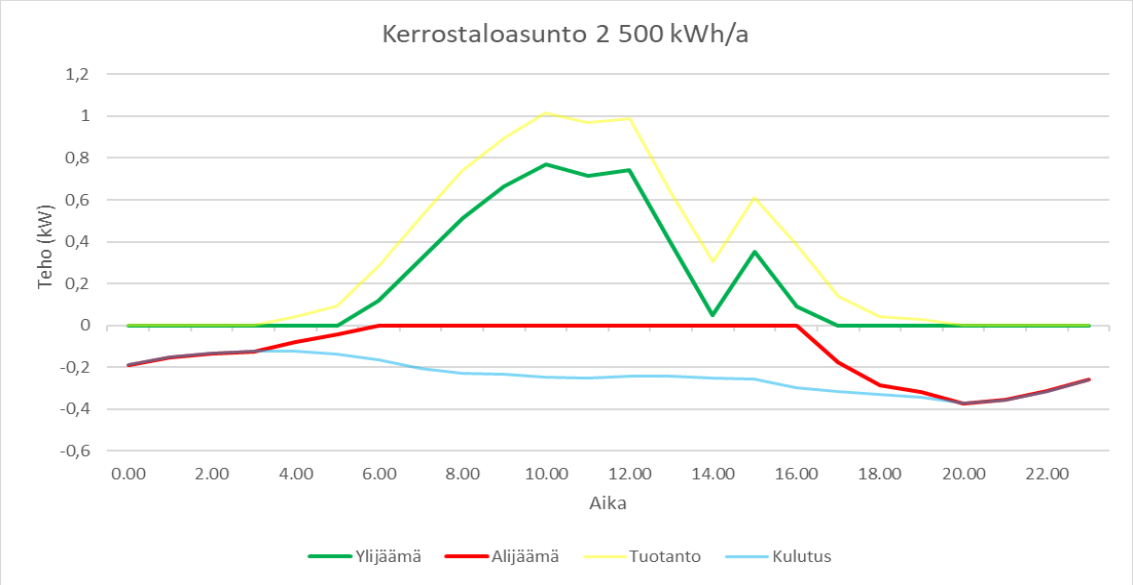
3.1.1 Kerrostalohuoneisto

Kuviossa 4 on sinisellä esitetty 2500 kWh sähköenergiaa vuodessa kuluttavan kerrostaloasunnon kulutusprofiili ja keltaisella 1250 kWh vuodessa tuottavan aurinkosähköjärjestelmän tuotantoprofiili tuntitasolla vuodessa. Tällaisen järjestelmän teho olisi noin 1,2 kWp. Näiden lisäksi kuviossa vihreällä ja punaisella on esitetty tuotannon ja kulutuksen erotukset tuotannon yli- ja alijäämänä tuntitasolla vuodessa.



KUVIO 4. Kerrostaloasunnon sähkön kulutuksen ja aurinkosähkötuotannon jakautuminen vuoden aikana

Kerrostalon ominaisuuksista ei ole tietoa, mutta kuviosta nähdään, miten sähköenergian kulutus on kesällä hieman vähäisempää. Kerrostalojen lämmitysmuotona on usein kaukolämpö, joten vuodenajalla ja ulkoilman lämpötilalla ei pitäisi olla juurikaan vaikutusta sähkönkulutukseen. Kesäkuukausien vähäisempi kulutus saattaa selittyä kuitenkin lomakauden vähäisemmällä käytöllä tai pesutilojen sähköisen lattialämmityksen vähemmällä tarpeella kesällä. Asuntokohtaisten ilmalämpöpumppujen yleistyessä myös sähkönkulutus oletettavasti lisääntyy kesällä. Kuviossa 5 on erään kesäpäivän tuotanto, kulutus sekä yli- ja alijäämä eri ajankohtina kerrostaloasunnossa, havainnollistamaan yli- ja alijäämän vaihtelua vuorokauden aikana.



KUVIO 5. Kerrostaloasunnon erään vuorokauden kulutus, tuotanto sekä yli- ja alijäämä kesällä

Kuviosta nähdään, miten tuotannon kasvaessa keskipäivällä syntyy ylijäämää, koska kulutus pysyy melko tasaisena koko päivän ajan. Keskipäivän ylijäämää käyttäjä voisi hyödyntää esimerkiksi ruuanlaittoon tai asunnon jäähdyttämiseen. Erilaisella aurinkopaneelien suuntauksella ja kallistuksella saisi erilaisen tuotantoprofiilin, jolloin myös omakäyttöaste olisi erilainen.

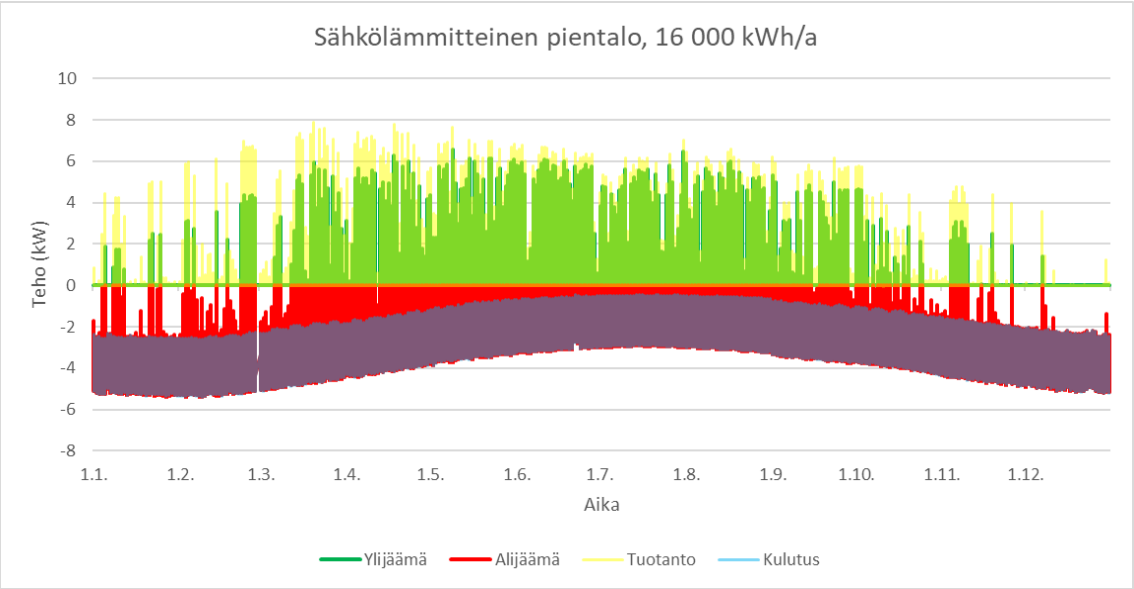
Alla olevaan taulukkoon 1 on koottu avainlukuja tuotannon ja kulutuksen välisestä suhteesta vuositasolla. Taulukosta nähdään, että vaikka aurinkosähköjärjestelmällä tuotetulla sähköenergialla kattaisi puolet vuoden sähkönkulutuksesta, tuotetusta energiasta noin 52 % myydään verkkoon, ja verkosta ostetaan noin 76 % vuoden sähköenergian kulutuksesta. Eli vaikka vuositasolla energiaa tuotettaisiinkin 50 % tarvittavasta, vähentää itse tuotettu sähköenergia verkosta ostettavaa energiaa kerrostaloasunnossa 24 %, eli itse tuotetusta energiasta hyödynnetään kiinteistön sisällä 48 %, joka on järjestelmän omakäyttöaste. Tuotannon mukaisen kuormanohjauksen potentiaali kerrostaloasunnossa, 1250 kWh vuodessa tuottavalla aurinkosähköjärjestelmällä olisi vuodessa siis noin 52 % eli 653 kWh.

TAULUKKO 1. Aurinkosähkön tuotannon hyödyntäminen kerrostalossa

Kulutus	Tuotanto	Omakäyttö	Ylijäämä	Alijäämä
2500 kWh/a	1250 kWh/a	597 kWh/a	653 kWh/a	1903 kWh/a
	50 %	48 %	52 %	76 %
	kulutuksesta	tuotannosta	tuotannosta	kulutuksesta

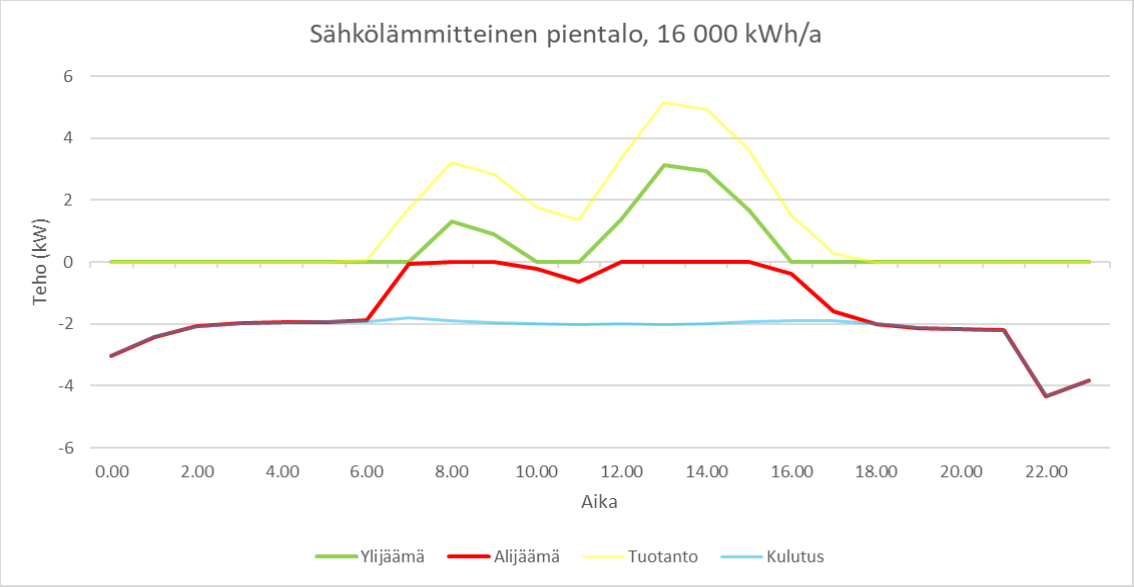
3.1.2 Pientalo, suora sähkölämmitys

Kuviossa 6 on sinisellä esitetty 16000 kWh sähköenergiaa vuodessa kuluttavan sähkölämmitteisen pientalon kulutusprofiili ja keltaisella 8000 kWh vuodessa tuottavan aurinkosähköjärjestelmän tuotantoprofiili tuntitasolla vuodessa. Tällaisen järjestelmän teho olisi noin 7,8 kWp. Näiden lisäksi kuviossa vihreällä ja punaisella on esitetty tuotannon ja kulutuksen erotukset tuotannon yli- ja alijäämänä tuntitasolla vuodessa.



KUVIO 6. Pientalon sähkön kulutuksen ja aurinkosähkötuotannon jakautuminen vuoden aikana

Sähkölämmitteisen pientalon sähkönkulutus painottuu selvästi kylmemmille kuukausille, jolloin aurinkosähköjärjestelmän tuotanto on huomattavasti vähäisempää tai sitä ei ole olenkaan. Kesäkuukausinakin tuotanto ja kulutus ovat melko eriaikaisia. Kuviossa 7 on erään kevätpäivän tuotanto, kulutus sekä yli- ja alijäämä eri ajankohtina sähkölämmitteisessä pientalossa, havainnollistamaan yli- ja alijäämän vaihtelua vuorokauden aikana.



KUVIO 7. Pientalon erään vuorokauden kulutus, tuotanto sekä yli- ja alijäämä keväällä

Kuviosta nähdään, miten aamupäivällä tuotanto muuttuu ylijäämäisestä alijäämäiseksi tuotannon pudotessa, mahdollisesti pilvien takia, ja taas ylijäämäiseksi tuotannon noustessa. Kulutus pysyy melko tasaisena päivällä, mutta lisääntyy illalla, mihin esimerkiksi saunominen voi olla yksi syy. Yöllä lisääntyvää kulutusta ei aurinkoenergialla voi korvata, mutta ylijäämäenergiaa voisi käyttää esimerkiksi päivällä saunomiseen. Erilaisella aurinkopaneelien suuntauksella ja kallistuksella saisi erilaisen tuotantoprofiilin, jolloin myös omakäyttöaste voisi olla erilainen.

Alla olevaan taulukkoon 2 on koottu avainlukuja tuotannon ja kulutuksen välisestä suhteesta vuositasolla. Taulukosta nähdään, että vaikka aurinkosähköjärjestelmällä tuotetulla sähköenergialla kattaisi puolet vuoden sähkönkulutuksesta, tuotetusta energiasta noin 66 % myydään verkkoon, ja verkosta ostetaan noin 83 % vuoden sähköenergian kulutuksesta. Eli vaikka vuositasolla energiaa tuotettaisiinkin puolet tarvittavasta, vähentää itse tuotettu sähköenergia verkosta ostettavaa energiaa pientalossa 17 %, eli itse tuotetusta energiasta hyödynnetään kiinteistön sisällä 34 %, joka on järjestelmän omakäyttöaste. Tämä on vertailun pienin prosentuaalinen luku, eli pientalossa aurinkosähköjärjestelmällä itse tuotettu energia hyödynnetään huonoiten. Tämä johtuu, kuten kuviosta 5 nähdään, kulutuksen merkittävästä painottumisesta talvi kuukausille, kun aurinkosähkön tuo-

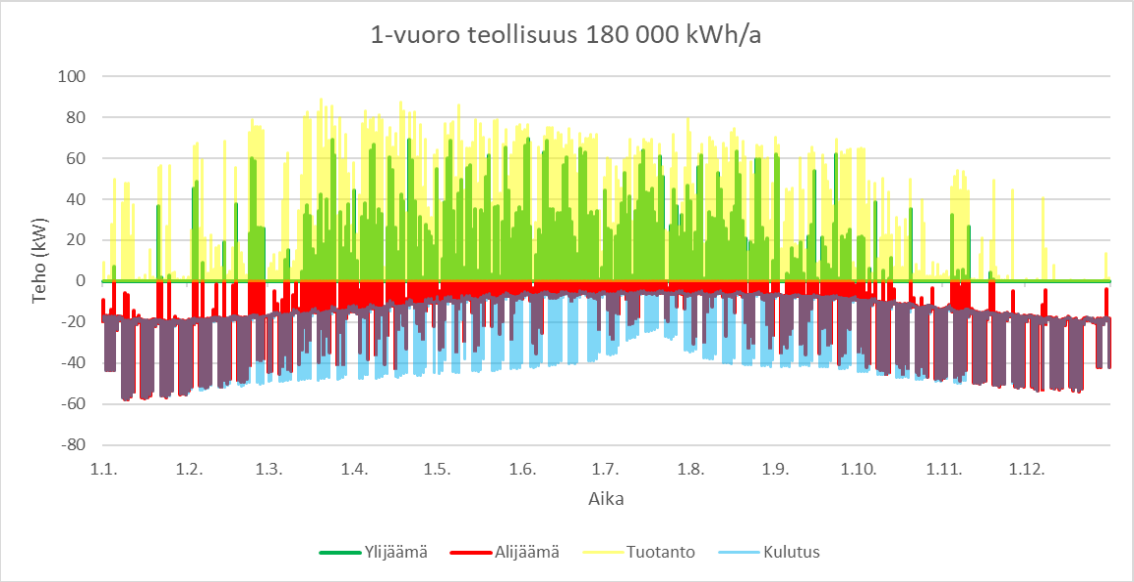
tanto on vähäisintä. Tuotannon mukaisen kuormanohjauksen potentiaali tällaisessa kiinteistössä, 8000 kWh vuodessa tuottavalla aurinkosähköjärjestelmällä olisi vuodessa siis noin 66 % eli 5264 kWh.

TAULUKKO 2. Aurinkosähkön tuotannon hyödyntäminen pientalossa

Kulutus	Tuotanto	Omakäyttö	Ylijäämä	Alijäämä
16000 kWh/a	8000 kWh/a	2736 kWh/a	5264 kWh/a	13264 kWh/a
	50 %	34 %	66 %	83 %
	kulutuksesta	tuotannosta	tuotannosta	kulutuksesta

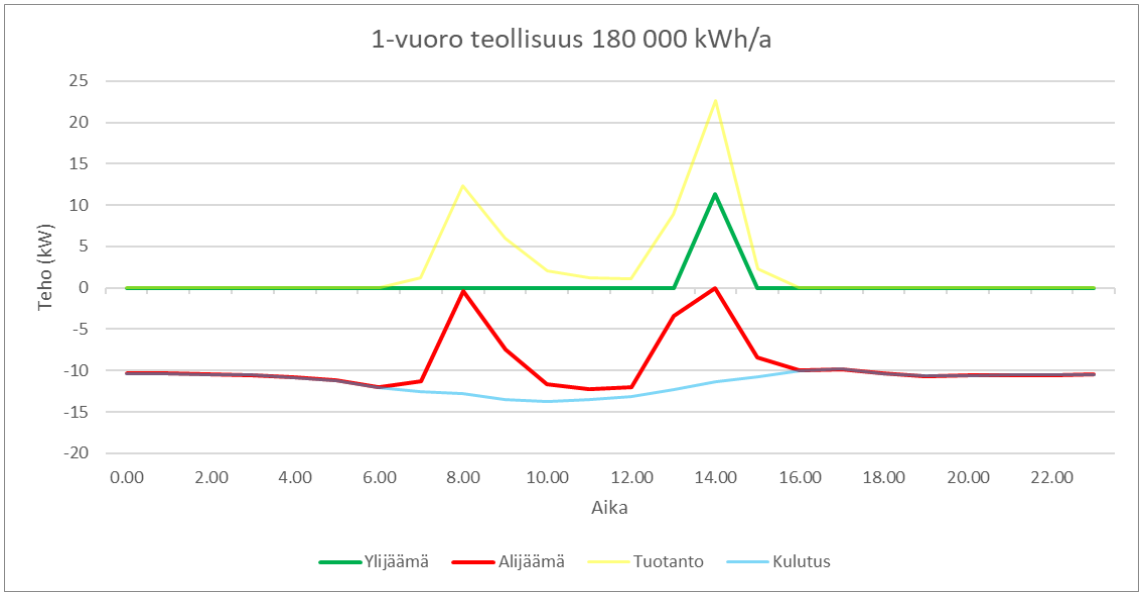
3.1.3 Teollisuus, 1-vuoro

Kuviossa 8 on sinisellä esitetty 180 MWh sähköenergiaa vuodessa kuluttavan yhdessä vuorossa toimivan teollisuuskiinteistön kulutusprofiili ja keltaisella 90 MWh vuodessa tuottavan aurinkosähköjärjestelmän tuotantoprofiili tuntitasolla vuodessa. Tällaisen järjestelmän teho olisi noin 87,6 kWp, mikä on jo melko iso kokoinen, mutta ison teollisuushallin katolle mahdollisesti toteutettavissa. Näiden lisäksi kuviossa vihreällä ja punaisella on esitetty tuotannon ja kulutuksen erotukset tuotannon yli- ja alijäämänä tuntitasolla vuodessa.



KUVIO 8. 1-vuoro teollisuuden sähkön kulutuksen ja aurinkosähkötuotannon jakautuminen vuoden aikana

Kylmempinä kuukausina, kun sähkönkulutus on suurempaa ja aurinkosähköjärjestelmän tuotanto vähäisempää, on myös teollisuuskiinteistö alijäämäinen sähköenergian suhteen. Kevät ja kesäkuukausina omatuotantoenergiaa hyödynnetään kuitenkin hyvin, mikä huomataan kuviossa 8 enemmän kuin muiden kiinteistöjen vastaavissa kuvioissa näkyvänä sinisenä kulutusta kuvaavana palkkina, jota punainen alijäämää kuvaava palkki ei peitä. Kuviossa 9 on erään syyspäivän tuotanto, kulutus sekä yli- ja alijäämä eri ajankohtina, havainnollistamaan yli- ja alijäämän vaihtelua vuorokauden aikana.



KUVIO 9. 1-vuoro teollisuuden erään vuorokauden kulutus, tuotanto sekä yli- ja alijäämä syksyllä

Kuviosta nähdään, miten verkosta ostettu ja sinne myyty sähköenergia vaihtelee hyvinkin nopeasti tuotannon mukaisesti. Tätä vaihtelua olisi hyvä tasoittaa varsinkin koko sähköverkkoon vaikuttavissa suuremmissa kohteissa, kuten teollisuudessa. Erilaisella aurinkopaneelien suuntauksella ja kallistuksella saisi erilaisen tuotantoprofiilin, jolloin myös omakäyttöaste voisi olla erilainen.

Alla olevaan taulukkoon 3 on koottu avainlukuja tuotannon ja kulutuksen välisestä suhteesta vuositasolla. Taulukosta nähdään, että vaikka aurinkosähköjärjestelmällä tuotetulla sähköenergialla kattaisi puolet vuoden sähkönkulutuksesta, tuotetusta energiasta noin 38 % myydään verkkoon, ja verkosta ostetaan noin 69 % vuoden sähköenergian kulutuksesta. Eli vaikka vuositasolla energiaa tuotettai-

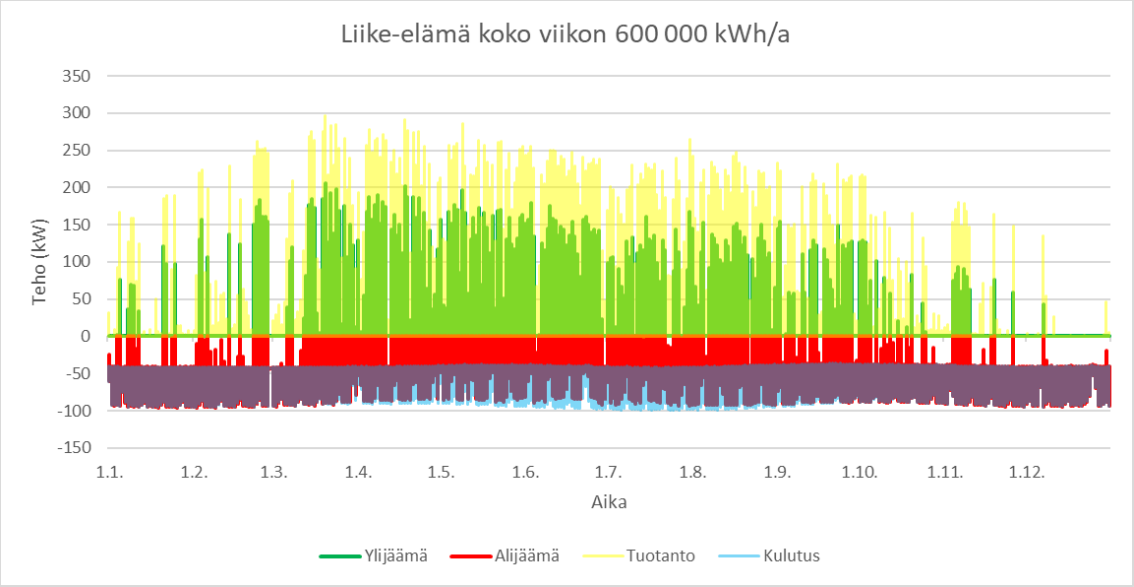
siinkin puolet tarvittavasta, vähentää itse tuotettu sähköenergia verkosta ostettavaa energiaa 1-vuoro teollisuudessa 31 %, eli itse tuotetusta energiasta hyödynnetään kiinteistön sisällä 62 %, joka on järjestelmän omakäyttöaste. Tämä on vertailun suurin prosentuaalinen luku, eli teollisuudessa aurinkosähköjärjestelmällä itse tuotettu energia hyödynnetään parhaiten. Tämä johtuu, kuten kuviosta 7 nähdään, melko tasaisesta vuosikulutuksesta, ja varsinkin kesäajan hyvästä tuotetun energian hyödyntämisestä. Tuotannon mukaisen kuormanohjauksen potentiaali tällaisessa kiinteistössä, 90000 kWh vuodessa tuottavalla aurinkosähköjärjestelmällä olisi vuodessa siis noin 38 % eli 33844 kWh.

TAULUKKO 3. Aurinkosähkön tuotannon hyödyntäminen 1-vuoro teollisuudessa

Kulutus	**Tuotanto**	**Omakäyttö**	**Ylijäämä**	**Alijäämä**
180000 kWh/a	90000 kWh/a	56156 kWh/a	33844 kWh/a	123844 kWh/a
	50 %	62 %	38 %	69 %
	kulutuksesta	Tuotannosta	tuotannosta	kulutuksesta

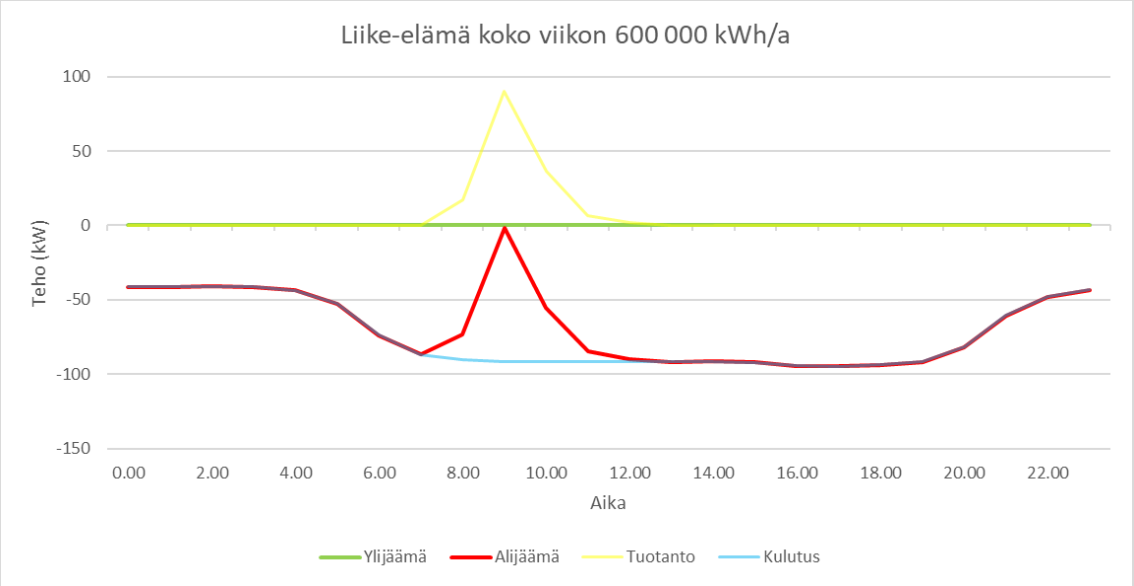
3.1.4 Liike-elämä, auki viikonloppuisin

Kuviossa 10 on sinisellä esitetty 600 MWh sähköenergiaa vuodessa kuluttavan liikerakennuksen kulutusprofiili ja keltaisella 300 MWh vuodessa tuottavan aurinkosähköjärjestelmän tuotantoprofiili tuntitasolla vuodessa. Tällaisen järjestelmän teho olisi noin 292 kWp, mikä on jo melko iso voimala, ja vaatisi paljon kattopintaalaa. Näiden lisäksi kuviossa vihreällä ja punaisella on esitetty tuotannon ja kulutuksen erotukset tuotannon yli- ja alijäämänä tuntitasolla vuodessa.



KUVIO 10. Liikekiinteistön sähkön kulutuksen ja aurinkosähkötuotannon jakautuminen

Liikekiinteistön kulutus on hyvin tasaista ympärivuoden, mutta eri juhlapyhien, kuten Juhannuksen ja Joulun vaikutus kulutukseen näkyy kuviossa. Kesällä omatuotantoenergiaa hyödynnetään melko hyvin. Kuviossa 11 on erään talvipäivän tuotanto, kulutus sekä yli- ja alijäämä eri ajankohtina, havainnollistamaan yli- ja alijäämän vaihtelua vuorokauden aikana.



KUVIO 11. Liikerakennuksen erään vuorokauden kulutus, tuotanto sekä yli- ja alijäämä talvella

Kuviosta nähdään, miten aamupäivän hetkellinen tuotanto tasoittaa verkosta ostettavan energian määrän lähelle nollaa, mutta talven vähäinen auringonpaiste ei

synnytä verkkoon myytävää sähköenergiaa. Erilaisella aurinkopaneelien suuntauksella ja kallistuksella saisi erilaisen tuotantoprofiilin, jolloin myös omakäyttöaste voisi olla erilainen.

Alla olevaan taulukkoon 4 on koottu avainlukuja tuotannon ja kulutuksen välisestä suhteesta. Taulukosta nähdään, että vaikka aurinkosähköjärjestelmällä tuotetulla sähköenergialla kattaisi puolet vuoden sähkönkulutuksesta, tuotetusta energiasta noin 39 % myydään verkkoon, ja verkosta ostetaan noin 70 % vuoden sähköenergian kulutuksesta. Eli vaikka vuositasolla energiaa tuotettaisiinkin puolet tarvittavasta, vähentää itse tuotettu sähköenergia verkosta ostettavaa energiaa liikekiinteistössä 30 %, eli itse tuotetusta energiasta hyödynnetään kiinteistön sisällä 61 %, joka on järjestelmän omakäyttöaste. Tuotannon mukaisen kuormanohjauksen potentiaali tällaisessa kiinteistössä, 300 MWh vuodessa tuottavalla aurinkosähköjärjestelmällä olisi vuodessa siis noin 39 % eli 118389 kWh.

TAULUKKO 4. Aurinkosähkön tuotannon hyödyntäminen liikekiinteistössä

Kulutus	Tuotanto	Omakäyttö	Ylijäämä	Alijäämä
600000 kWh/a	300000 kWh/a	181611 kWh/a	118389 kWh/a	418389 kWh/a
	50 %	61 %	39 %	70 %
	kulutuksesta	tuotannosta	tuotannosta	kulutuksesta

3.2 Potentiaaliset kuormat

Tyypillisimpiä kulutuskohteita kiinteistössä ovat kiinteistön olosuhteita ylläpitävät lämmityksen, jäähdytyksen ja ilmanvaihdon laitteet sekä valaistus. Näistä muodostuu usein se kiinteistön pohjakuorma, jonka mukaan aurinkosähköjärjestelmä mitoitetaan. Nämä ovat myös usein merkittäviä energian kulutuskohteita kiinteistössä, joten näiden ylimääräinen käyttö ylijäämäenergialla ei ole järkevää. Esimerkiksi ilmanvaihdon turha tehostaminen saattaa lisätä lämmitys- tai jäähdytyskuluja.

Kiinteistössä on myös sen käyttötarkoitusta palvelevat laitteet, esimerkiksi toimistoissa tietokoneet ja tietoverkon laitteet, päivittäistavarakaupassa kassat ja kylmälaitteet, asuinrakennuksissa kodinkoneet ja viihde-elektroniikka, ja niin edelleen. Edellä mainittuja laitteita käytetään kiinteistössä yleensä jatkuvasti tai tarve

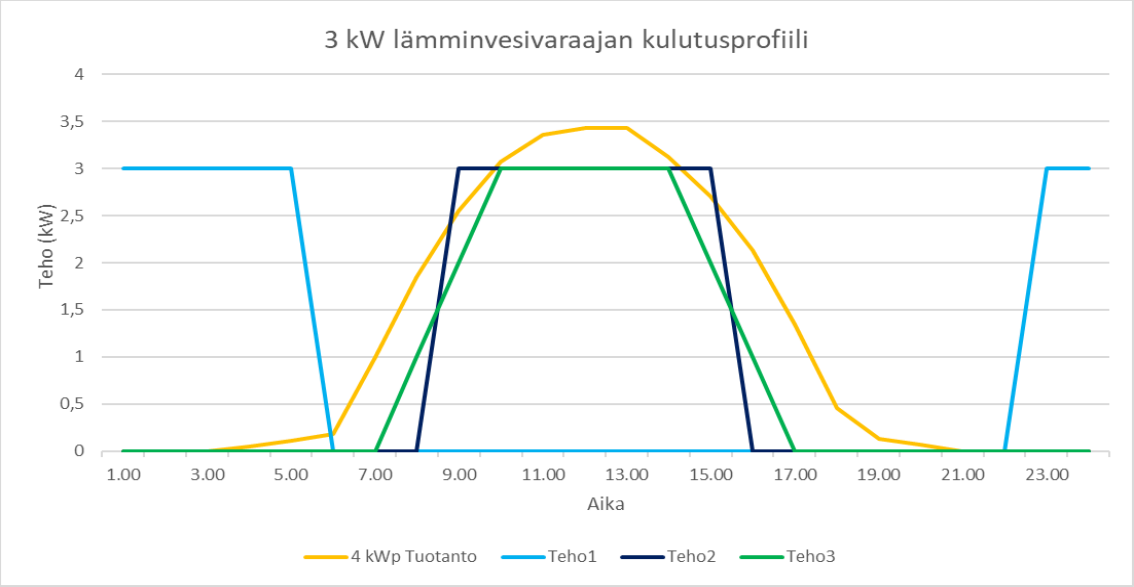
käyttää niitä riippuu käyttäjästä, joten tällaisia laitteita ei voi ohjata itse tuotetun sähköenergian mukaan käyttötarkoituksesta tai käyttömukavuudesta tinkimättä.

Kuten jo aikaisemmin todettu, aurinkosähköjärjestelmällä tuotettua energiaa, jota ei suoraan kyetä hyödyntämään kiinteistössä itse, voidaan varata sähköautoon, tai lämpönä varaajaan, joko suoraan sähköllä tai lämpöpumpulla. Esimerkiksi NIBEllä on ratkaisu, jossa lämpöpumppu ja aurinkosähköjärjestelmä yhdistetään toisiinsa erillisellä integrointimoduulilla, joka kertoo aurinkosähköjärjestelmän tuoton lämpöpumpulle, ja lämpöpumppu optimoi toimintansa tuotetun energian hyödyntämiseksi. NIBEltä on saatavilla pientaloihin tarkoitettua valmista aurinkosähköjärjestelmää kolmessa erikoossa, 4 kW, 5,6 kW ja 8 kW, mutta integrointimoduulilla voi liittää myös olemassa olevan aurinkosähköjärjestelmän NIBEn lämpöpumppuun. (NIBE n.d.)

Seuraavissa alaluvuissa havainnollistetaan edellä mainittujen sähkölaitteiden kulutusprofiileja erilaisilla ohjaustavoilla vuorokaudessa. Eri ohjaustapojen kulutusprofiileja verrataan aurinkosähköjärjestelmän tuotantoon, jonka jälkeen pohditaan niiden vaatimuksia ja vaikutuksia.

3.2.1 Lämminvesivaraaja

Hypoteettisessa 300 litran lämminvesivaraajassa lämmitetään 5-asteinen vesi 60-asteeseen 3 kW sähkövastuksella, jolloin energian tarve karkeasti on noin 21 kWh, eli 3 kW varaajan täytyy olla päällä noin 7 tuntia. Kuviossa 12 Teho 1 kuvaa erityisesti sähkölämmitteisissä pientaloissa käytettävää kytkentää, jossa varaaja kytkeytyy päälle noin iltayhdeltätoista yösähköohjauksella. Teho 2 kuvaa samaa kytkentää kuin Teho 1, mutta päällekytkentäaika on muutettu aamukahdeksaan. Teho 3 kuvaa kytkentää, jossa varaajan tehoa kasvatetaan portaittain kytkemällä yksi vaihe kerrallaan aamuseitsemästä alkaen. Tuotanto kuvaa 4 kWp aurinkosähköjärjestelmän tuotantoa erään kesäkuun vuorokautena.

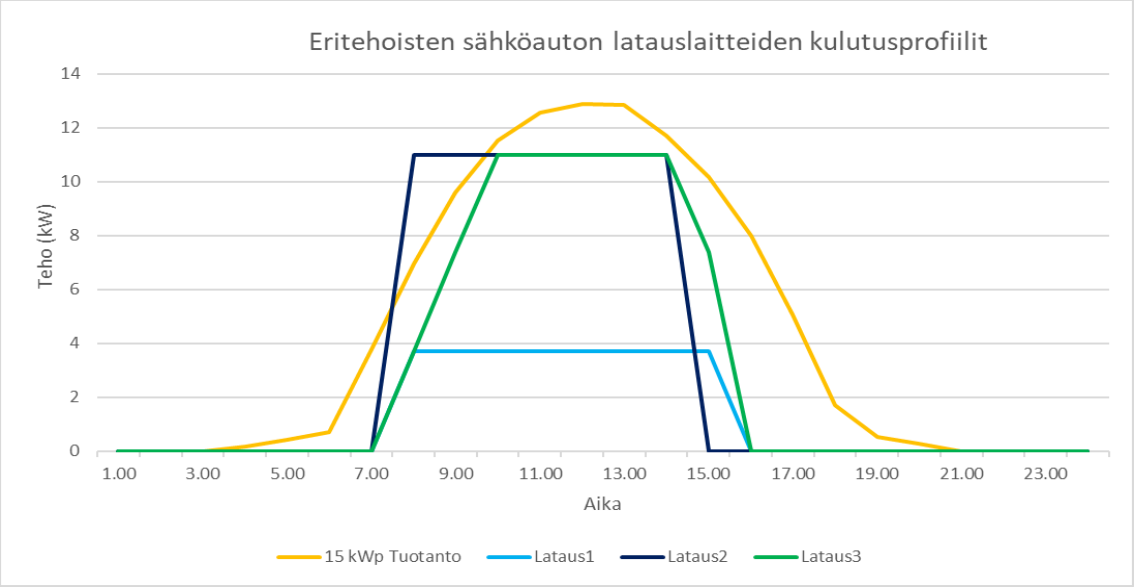


KUVIO 12. Lämminvesivaraajan tehoprofiilit erilaisilla ohjauksilla ja 4 kWp aurinkosähköjärjestelmän tuotantoprofiili

Kuviosta nähdään miten yösähköohjauksella toteutettu lämminvesivaraaja ei hyödynnä aurinkosähköjärjestelmän tuotantoa juuri lainkaan, kun taas kytkentäaikaa muuttamalla lähes kaikki veden lämmittämiseen tarvittava energia voidaan kattaa omatuotannolla. Ohjausta kuitenkin hieman monimutkaistamalla voidaan vesi lämmittää pelkällä omatuotannolla. Esimerkin mukainen kytkentä, jossa tehoa nostetaan yksi vaihe kerrallaan päälle kytkemällä, aiheuttaa sähköjärjestelmään epätasapainoa vaiheiden välille, mikä suuremmassa mittakaavassa tehtynä voi vaikuttaa jopa sähköverkkoon.

3.2.2 Sähköauton latausasema

Hypoteettista sähköautoa, jonka akun kapasiteetti on noin 75 kWh, ladataan työpaikalla. Lataus tapahtuu tavanomaisen työpäivän aikana aamukahdeksan ja iltapäiväneljän välillä. Kuviossa 13 Lataus1 kuvaa 1-vaiheista 3,7 kW laturia, ja Lataus2 3-vaiheista 11 kW laturia, jotka kytketään suoraan täydelle teholle aamukahdeksalta. Lataus3 kuvaa laturia, joka porrastaa noin 3,7 kW portaissa laustehoa aamukahdeksasta alkaen ylöspäin ja taas alaspäin iltapäivää kohden, tuotannon mukaan. Tuotanto kuvaa 15 kWp aurinkosähköjärjestelmän tuotantoa erään kesäkuun vuorokautena.



KUVIO 13. Sähköauton latausaseman tehoprofiilit erilaisilla ohjauksilla ja 15 kWp aurinkosähköjärjestelmän tuotantoprofiili

Älykkäällä kuormanohjauksella latausteho voisi seurata tarkasti tuotantoa, mutta jo tällaisella yksinkertaisellakin ohjauksella voidaan vähentää esimerkiksi verkosta ostettavan sähköenergian määrää. Näistä Lataus1:llä saadaan sähköautoa ladattua 29,6 kWh, mikä on melko vähän, noin 40 % tapauksen kuvitteellisesta akun kapasiteetista. Lataus2:lla saadaan ladattua 77 kWh, mikä taas on enemmän kuin tapauksen kuvitteellisen akun kapasiteetti ja monen muun sähköauton akun kapasiteetti, mutta osa energiasta ostetaan silti verkosta. Lataus3:lla saadaan sähköautoa ladattua tässä tapauksessa 73,5 kWh, mikä on 98 % tapauksen kuvitteellisesta akun kapasiteetista, ja täysin ilman verkosta ostettavaa energiaa. Tällainen tuotannon mukainen ohjaus vaatii kuitenkin myös sen, että ladattavalla sähköautolla on siihen soveltuvat ominaisuudet, kuten kyky vastaanottaa latausta eri tehoilla. Myös tämän esimerkin mukaisessa ratkaisussa, jossa vaihe kerrallaan lisätään tehoa, ongelmaksi voi jälleen muodostua vaiheiden epätasainen kuormittuminen.

4 AURINKOSÄHKÖJÄRJESTELMIEN KUORMANOHJAUS

Sähkökeskusten valmistajilla ja aurinkosähköjärjestelmien toimittajalla työskenteleviä alan ammattilaisia haastateltiin aurinkosähköjärjestelmiin, kuormanhallintaan ja käytön optimointiin liittyen. Haastateltavilta kysyttiin markkinoilta löytyvistä kuormanhallinnan tuotteista ja ratkaisuista, kehitteillä olevista innovaatioista, sekä keskusteltiin aurinkosähkön tuotannon ja kulutuksen optimoinnin muista mahdollisuuksista. Haastattelujen tavoitteena oli löytää valmiita ratkaisuja aurinkosähkön käytön optimointiin. Myös kaikki erilaiset tuotteet ja ideat kuormanohjauksen mahdollistamiseksi huomioitiin ja niiden mahdollisuuksista keskusteltiin. Pohdittiin myös muita tapoja hyödyntää aurinkosähköjärjestelmällä tuotetun ylimääräisen energian hyödyntämistapoja.

4.1 Markkinoilta löytyvät ratkaisut

Edullisin ja paras ratkaisu kuormanhallintaan on UTU Finland Oy:n tehoelektroniikan myyntipäällikkö Joona Riihimäen (2023) mukaan itse käyttäjä, mutta näkee hyvinä ratkaisuina myös erilaiset sähköautojen latauslaitteiden kuormanhallintajärjestelmät ja muut energiavarastot. Riihimäki ei kuitenkaan pidä ylimääräisen energian sähköverkkoon myyntiä huonona asiana. UTUn sähkökeskus liiketoimintayksikön päällikkö Markus Kemikangas (2023) ei pidä kuormanhallinnan rakentamista kannattavana, jos sähkön hinta on matala tai tasainen, mutta mainitsee potentiaalisina tuotannon mukaan ohjattavina kuormina muun muassa kiinteistön olosuhteita ylläpitävät LVI-laitteet, joiden avulla itse kiinteistö voi toimia energiavarastona. Myöskään UTUn sähkönsyötön varmennus ja laatu -osaston tuotepäällikkö Harri Päivärinta (2023) ei varsinaisia vakioratkaisuja markkinoilta tunne, mutta nostaa esiin kuitenkin UTUn aikaisemmin valikoimasta löytyneen valmistajan SMA:n EV Chargerin ja nykyisin valikoimasta löytyvän Ratio Electricin Solid latausasemat, jotka voidaan liittää suoraan aurinkosähköjärjestelmään tuotannon optimaaliseksi hyödyntämiseksi.

Isoihin liikekiinteistöihin ja aurinkovoimapuistoihin aurinkosähköjärjestelmiä toteuttavan Solarigo Systems Oy:n Development Engineer Roope Raisio (2023) kertoo aurinkosähköjärjestelmän mitoituksen lähtevän siitä, että kaikki tuotettu sähköenergia hyödynnetään itse, eli ylimitoitusta pyritään välttämään, jolloin erityiselle kuormanohjaukselle ei ole tarvetta. Olemassa oleviin kiinteistöihin mitoitus tapahtuu Raision mukaan aikaisemman kulutuksen perusteella, ja uusiin kohteisiin sähkösuunnittelijan tai energiaselvityksen kulutusarvion perusteella.

Haastattelujen perusteella markkinoilta ei vielä löytynyt vakiintuneita ratkaisuja aurinkosähkön tuotannon mukaiseen kuormanhallintaan. Haastatteluissa ei myöskään tullut ilmi, että esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmän invertterillä pystyisi suoraan ohjaamaan tuotannon mukaan kuormia kytkeviä perinteisiä kontaktoreja. Päinvastoin invertterin syöttämää tehoa voidaan kuitenkin rajoittaa liittymän koon mukaan, invertterit voidaan liittää suoraan rakennusautomaatioväylään, ja ne myös säätävät loistehoa verkon tarpeen mukaan (Raisio 2023). Eli inverttereistä löytyy älyä ja tekniikkaa kommunikoimaan muiden järjestelmien kanssa, mutta kuormanohjaus vaatii vielä erillistä älyä. Raision mukaan vastaan on kuitenkin tullut muun muassa Fronius Smart Meter -älymittarilla toteutettuja aurinkosähköjärjestelmän tuotannon mukaan ohjattavia lämminvesivaraajia, sekä joitain älykkäitä aurinkosähköjärjestelmään kytkettyjä sähköauton latauslaitteita, mutta nämäkin ratkaisut ovat olleet kolmannen osapuolen toteuttamia.

4.2 Kehitys ja muut mahdollisuudet

Kiinteistön eri järjestelmät yhdistävillä ja älykästä sähköverkkoa hyödyntävillä älykeskuksilla voidaan omatuotanto ja sähkönkulutus optimoida tehokkaasti, mutta tällaiset ovat Kemikankaan (2023) mukaan UTUlla vielä kehitysvaiheessa. Muita kehitteillä olevia ratkaisuja haastatteluissa ei tullut ilmi. Aurinkosähköjärjestelmän tuotannon mukaiseen ohjaukseen kehitettäviä ratkaisuja markkinoilta varmasti silti löytyy.

Suuriin akustoihin liitetyt aurinkosähköjärjestelmät ovat potentiaalisia sähköverkkojen erilaisilla reservimarkkinoilla. Ilmaisella aurinkoenergialla ladatut sähkövarastot voidaan erilaisissa sähköverkon häiriötilanteissa hyödyntää sellaisenaan

syöttämällä sähköenergiaa verkkoon sitä tasapainottaakseen. Vaihtoehtoisesti suuritehoinen kiinteistö, jossa sähkövarasto sijaitsee, voidaan vaihtaa niin sanottuun saarekekäyttöön eli irrottaa hetkellisesti sähköverkosta, mikä taas voi auttaa sähköverkon tasapainottamisessa. Tällaiset järjestelmät vaativat myös monenlaisia kuormanohjausratkaisuja esimerkiksi muiden kuin saarekekäytön aikaisten kuormien pois kytkentään, ja nopeaa tiedonsiirtoa esimerkiksi sähköverkkoa valvovan kantaverkkoyhtiö Fingridin järjestelmien kanssa. Sähkön edullinen markkinahinta yhdistettynä korkeisiin reservimarkkinahintoihin tekee aurinkosähkönjärjestelmän hyödyntämisestä tällaisessa ratkaisussa hyvinkin kannattavaa (Raisio 2023.) UTUn Päivärinta (2023) näkee yhtenä aurinkosähköjärjestelmän hyödyntämisen mahdollisena tehostuskeinona myös paneelien tuottaman tasavirran käytön suoraan kiinteistön kulutuskohteissa akustojen rinnalla, jolloin invertterien ja säätimien häviöitä voidaan vähentää.

5 TULOKSET

Työn aikana ei tullut vastaan vakiintuneita omatuotantoenergian kuormanohjausratkaisuja, joita voitaisiin verrata esimerkiksi sähkölämmitysten ohjaukseen tarkoitettuun Sähkölaitosyhdistyksen kytkentäsuositukseen eli SLY-kytkentään. Joillain valmistajilla on omia valmisratkaisujaan aurinkosähköjärjestelmän ja esimerkiksi sähköauton latausaseman tai lämpöpumpun toisiinsa liittämiseksi, jolloin itse tuotettua energiaa pyritään hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti.

Haastatteluissa esiin nousseen, UTU Finland Oy:n valikoimasta löytyvän, Ratio Electricin Solid latausasemassa on dynaaminen kuormanhallinta, ja tuotekortissa mainintaan myös aurinkoenergian käyttömahdollisuudesta. Se mitä tämä tarkalleen ottaen tarkoittaa, ei käy tuotetiedoista ilmi, mutta dynaamisen kuormituksen tasapainotustoiminnon kuvauksessa sanotaan, että sillä ”voidaan valita sähköverkosta otettava energiamäärä samalla, kun hyödynnetään aurinkosähköjärjestelmää optimaalisesti”. (UTU Oy 2022.) Eli oletettavasti latausasema pyrkii lataamaan vain aurinkosähköjärjestelmällä tuotetulla energialla, ja minimoimaan verkosta ostettavan energian määrän.

Yhtenä tavoitteena oli löytää yksinkertainen laite, jossa olisi tuotannon tai mitattavan energian mukaan ohjelmoitavat releet, joilla ohjata sähkökuormaa. Haastatteluissa mainittu Fronius Smart Meter vaikutti lupaavalta laitteelta tällaiseksi. Nopean tutkinnan jälkeen selvisi kuitenkin, että kyseisen laite kytketään invertteriin ja muihin mittareihin tai rakennusautomaatiojärjestelmään RS485 -väylällä, eikä mitään varsinaisia ohjattavia kärkiä laitteessa ole (SW Energia Oy n.d.).

Paras ratkaisu aurinkosähköjärjestelmän tuotannon ylijäämälle vaikuttaa olevan erilaiset energiavarasto, kuten vesivaraajat, sähköautot ja akustot. Joidenkin kuormien ohjaus tuotannon perusteella saattaa vaikuttaa käyttömukavuuteen ja jopa tehdä erilaisissa kiinteistöissä toimimisesta vain liian hankalaa, joten se ei vaikuta kovin käytännölliseltä ratkaisulta. Erilaisten energiavarastojen kehittäminen saattaa olla paras ratkaisu aurinkosähköjärjestelmien ylijäämäenergian optimaaliseen hyödyntämiseen tulevaisuudessa.

6 POHDINTA

Erityyppisten kiinteistöjen sähkönkulutuksen tuntikulutustietoja ja aurinkosähköjärjestelmän vuoden tuotantoa vertailemalla löydettiin parhaiten itse tuotettua energiaa hyödyntävä ja eniten kuormanohjauspotentiaalia omaava kiinteistötyyppi. Käytettyjen tietojen perusteella vertailusta ei kuitenkaan voida tehdä suoria johtopäätöksiä. Tyyppikiinteistöjen mittaustiedot olivat koottu koko Suomen ja toisistaan jotenkin poikkeavien kiinteistöjen keskiarvosta, ja aurinkosähköjärjestelmän tuotantoprofiiliin vaikuttaa merkittävästi aurinkopaneelien suuntaus ja kallistus. Jokin kiinteistö voi toisenlaisella aurinkosähköjärjestelmällä hyödyntää omatuotantoenergiaa tehokkaammin, kuin nyt saaduista tuloksista selviää. Kiinteistöjen ja aurinkosähköjärjestelmien vertailuun on kuitenkin nyt olemassa menetelmä ja tarvittavat työkalut. Kiinteistöjen kulutusprofiilien vertailussa käytetystä Excel -tiedostosta voidaan kehittää työn toimeksiantajayritykselle yksinkertainen työkalu tuotannon ja kulutuksen samanaikaisuuden vertailuun.

Potentiaalisia kuormia ei työn aikana löytynyt niin kattavasti kuin aluksi oli tavoitteena, mutta sähköenergian varaaminen lämpönä lämminvesivaraajaan saattaa olla yksinkertaisin tapa energian varastoimiseen. Sähköajoneuvojen käyttäminen energiavarastoina tulee varmasti olemaan tulevaisuudessa yksi merkittävimmistä ylijäämäenergian hyödyntämiskeinoista. Sähköajoneuvojen määrän kasvaessa, ja niiden latauksen purkamisen takaisin sähköverkkoon yleistyessä, niistä tulee yksi olennainen osa tulevaisuuden älykkäitä sähköverkkoja, joissa omatuotantoenergia hyödynnetään juuri siellä missä sitä tuotetaan ja tarvitaan.

Vakioratkaisujen löytymisen heikkoon tulokseen vaikuttaa varmasti vähäinen haastateltujen yritysten määrä. Kuudesta haastatteluun pyydetystä yrityksestä vain kaksi suostui haastatteluun, mutta haastateltuja asiantuntijoita oli kuitenkin neljä. Aurinkosähkömarkkinat ovat melko suuret, ja toimijoita alalla on paljon markkinan monilta eri osa-alueilta, joten haastateltavia olisi varmasti riittänyt. Vähäisestä haastattelumäärästä huolimatta haastateltavat yritykset olivat työn aiheen kannalta juuri oleelliselta markkinan osa-alueelta, ja katsaus kuormanhallinnan vakioratkaisuihin luotettava.

LÄHTEET

Energiateollisuus ry. 2022. Energiavuosi 2022 Sähkö. PDF-julkaisu. Viitattu 24.1.2023. https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2022.pdf

Energiateollisuus ry. n.d. Aurinkoenergia. Energiamaailma. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2023. https://energiamaailma.fi/energiasta/energiantuotanto/aurinkovoima/

Euroopan komissio. 2022. REPowerEU-suunnitelma: tavoitteena vähentää riippuvuutta Venäjän fossiilisista polttoaineista ja edistää vihreää siirtymää nopeasti. Lehdistötiedoite 18.05.2022. Bryssel. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fi/ip_22_3131

Jalli, L. 2022. Uusilla aurinkokennoilla päästiin 23 % hyötysuhteeseen – Käytössä piikidettä edullisempi ratkaisu. Tekniikka&Talous. 14.6.2022. Viitattu 22.2.2023. https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/uusilla-aurinkokennoilla-paastiin-23-hyotysuhteeseen-kaytossa-piikidetta-edullisempi-ratkaisu/bd87bbdc-b7e2-4a14-ac19-2947fa04df18

Kemikangas, M. Liiketoimintayksikön päällikkö, sähkökeskukset. 2023. Haastattelu 29.03.2023. Teams-haastattelu.

LUT-yliopisto. 2022. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. Verkkosivu. Viitattu 4.3.2023. https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa

Motiva. 2022a. Sähköverkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän mitoitus. Verkkosivu. Viitattu 22.1.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkosahkojarjestelman_mitoitus

Motiva. 2022b. Ylijäämäsähkön myynti. Verkkosivu. Viitattu 22.1.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti

Motiva. 2022c. Auringonsäteilyn määrä Suomessa. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa

Motiva. 2022d. Tarvittava laitteisto. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto

Motiva. 2022e. Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma

Motiva. 2022f. Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä. Verkkosivu. Viitattu 22.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_kytkematon_aurinkosahkojarjestelma

Motiva. 2022g. Aurinkopaneelien asentaminen. Verkkosivu. Viitattu 23.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkopaneelien_asentaminen

Motiva. 2022h. Aurinkosähköjärjestelmän teho. Verkkosivu. Viitattu 23.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkojarjestelman_teho

Motiva. 2022i. Aurinkosähkön ja sähkönkulutuksen yhteensovittaminen. Verkkosivu. Viitattu 23.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkon_ja_sahkonkulutuksen_yhteensovittaminen

Motiva. 2022j. Tuotannon optimaalinen hyödyntäminen. Verkkosivu. Viitattu 23.2.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/tuotannon_optimaalinen_hyodyntaminen

Motiva. 2022k. Sähkön kulutusjousto – Joustavaa ja älykästä sähkönkäyttöä. Verkkosivu. Viitattu 23.2.2023. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/sahkon_kulutusjousto

Motiva. 2022l. Miten sähköautoa ladataan?. Verkkosivu. Viitattu 01.03.2023. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/sahkoautoillen_-_arjen_alykas_sahkoautoilu/sahkoauton_lataus

NIBE. n.d. Aurinkosähkö - hyödynnä auringon energia. Verkkosivu. Viitattu 07.04.2023. https://www.nibe.eu/fi/fi/tietopankki/aurinkosahko---ota-sateet-talteen

PVGIS. 2022. Photovoltaic Geographical Information System Online Tool. EU Science Hub. Euroopan Komissio. Viitattu 09.03.2023. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool_en

Päivärinta, H. Tuotepäällikkö, sähkönsyötön varmennus ja laatu. Haastattelu 29.03.2023. Teams-haastattelu.

Raisio, R. Project Development Engineer. 2023. Haastattelu 21.03.2023. Puhelinhaastattelu.

Riihimäki, J. Myyntipäällikkö, UPS-laitteet. 2023. Haastattelu 29.03.2023. Teams-haastattelu.

ST-käsikirja 40. 2021. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. ST-kortisto. Sähkötieto ry. Viitattu 26.03.2023. Vaatii käyttöoikeuden. https://severi.sahkoinfo.fi/

SW Energia Oy. n.d. FRONIUS SMART METER. Viitattu 08.04.2023. https://www.swenergia.fi/aurinkoenergia-kotiin-ja-yrityksille/aurinkoenergia-oma-kotitalot/fronius-smart-meter

Tampereen yliopisto. 2019. Valtakunnallisten tyyppikäyttäjämäärittelyiden päivittäminen ja hyödyntämisen periaatteet verkkopalvelumaksuihin liittyvissä tarkasteluissa. Energiavirasto. Viitattu 09.03.2023. https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Kuormitusprofiilit.xlsx/3fbf06a5-7126-2ddd-5c13-e777bcc81405

UTU Oy. 2022. Solid 3-vaiheinen 22 kW latausasema 5 m kaapeli kWh DKH Solar. Verkkosivu. Viitattu 08.04.2023. https://www.utugroup.com/fi/tuotteet/ratio-solid-3-vaiheinen-22-kw-asema-5-m-kaapeli-kwh-dlm-solar/

Valtioneuvoston asetus 767/2021 Sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta. Viitattu 18.4.2023. https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2021/20210767#Lidm45053757381456

Valtioneuvoston kanslia. 2017. Selvitys hajautetun energiantuotannon potentiaalista ja käyttöönoton näkymistä Suomessa. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 5/2017. Viitattu 24.1.2023. https://tietokayttoon.fi/julkaisu?pubid=16603