



Jaakko Hirvikunnas

Aurinkosähköjärjestelmät ja mitoitus pientaloon

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

21.5.2024

Tiivistelmä

Tekijä: Jaakko Hirvikunnas
Otsikko: Aurinkosähköjärjestelmät ja mitoitus pientaloon
Sivumäärä: 41 sivua
Aika: 21.5.2024

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine: Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat: Lehtori Jukka Karppinen

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä aurinkosähköjärjestelmien perusteisiin ja järjestelmän mitoitukseen. Teoreettisessa osuudessa käytiin läpi aurinkosähkön perusteet, aurinkopaneelien toiminta ja aurinkosähköjärjestelmien komponentit. Tarkoituksena oli antaa suunnittelijalle perustiedot, joiden avulla järjestelmiä voitiin vertailla ja valita.

Kohteen aurinkosähköjärjestelmän mitoitusta varten syvennyttiin aihetta koskevaan kirjallisuuteen, ohjeistaviin julkaisuihin, artikkeleihin sekä ST-kortistoihin. Näistä saadun teorian perusteella aloitettiin mitoittamaan kohteeseen oikean kokoista järjestelmää.

Käytännön osuudessa mitoitettiin kohteeseen aurinkosähköjärjestelmä käyttäen Euroopan komission PVGIS-työkalua. PVGIS-työkalulla simuloitiin eritehoisten järjestelmien sähköntuottoa ja verrattiin niitä kohteen kulutustietoihin. Näiden perusteella valittiin kohteeseen oikean kokoinen järjestelmä. Lopuksi vertailtiin eri jälleenmyyjien tarjouksia ja saatiin hinta-arvio kohteen aurinkosähköjärjestelmälle.

Työn tarkoituksena oli antaa suunnittelijalle perustiedot erilaisista aurinkosähkörtkaisuista ja järjestelmän mitoittamisesta.

Avainsanat: aurinkosähköjärjestelmä

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Jaakko Hirvikunnas
Title: Solar power systems and sizing for a single-family house
Number of Pages: 41 pages
Date: 21 May 2024

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation engineering
Professional Major: Electrical Power Engineering
Supervisors: Jukka Karppinen, Senior Lecturer

The purpose of this thesis was to familiarize with the basics of solar power systems and system sizing. The theoretical section covered the fundamentals of solar power, the operation of solar panels, and the components of solar power systems. The aim was to provide the designer with basic knowledge to compare and select different systems.

For sizing the solar power system for the target site, relevant literature, guiding publications, articles, and ST-cards were studied. Based on the theory obtained from these sources, the process of sizing an appropriately sized system for the site began.

In the practical section, the solar power system for the target site was sized using the European Commission's PVGIS tool. The PVGIS tool was used to simulate the electricity production of systems with different capacities and compare them to the site's consumption data. Based on this comparison, the appropriately sized system for the site was selected. Finally, offers from various retailers were compared, and a price estimate for the site's solar power system was obtained.

The purpose of the work was to provide the designer with basic knowledge of different solar power solutions and system sizing.

Keywords: Solar power system

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Aurinko energianlähteenä	2
2.1	Aurinkosähkön lyhyt historia	2
2.2	Aurinkoenergian hyödyntäminen Suomessa	4
2.3	Eri järjestelmät ja sovellukset	6
2.4	Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä	7
2.5	Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä	9
3	Aurinkosähköjärjestelmän komponentit	11
3.1	Aurinkopaneelit	11
3.1.1	Yksikideaurinkopaneelit	12
3.1.2	Monikidepaneelit	14
3.1.3	Ohutkalvoaurinkopaneelit	14
3.2	Kaapelointi	16
3.3	Vaihtosuuntaaja eli invertteri	17
3.4	Lataussäädin	20
3.5	Akustot	20
4	Aurinkosähköjärjestelmän suunnittelu	21
4.1	Mallikohde	21
4.2	Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus	23
4.2.1	PVGIS-työkalu	24
4.2.2	Aurinkosähköjärjestelmän tuoton mallinnus	25
4.3	Järjestelmän valinta ja kilpailutus	32
4.3.1	Tarjous A	33
4.3.2	Tarjous B	33
4.3.3	Asennusvalmis paketti jälleenmyyjältä	34
5	Pientuotannon liittäminen jakeluverkkoon	35
6	Tuet ja vähennykset	37
7	Yhteenveto	38
	Lähteet	39

1 Johdanto

Aurinkoenergia ja aurinkosähköjärjestelmät ovat nousseet vahvasti esiin kestäväen energian lähteinä monissa maissa ympäri maailmaa. Tähän vaikuttavia tekijöitä on muun muassa energiakustannusten jatkuva nousu ja ympäristötietoisuuden lisääntyminen. Myös aurinkoenergian hinta on laskenut merkittävästi viime vuosien aikana. Teknologian kehittyessä aurinkopaneelien tuotantokustannukset ovat pienentyneet, mikä on tehnyt aurinkoenergiasta kilpailukykyisen vaihtoehdon perinteisille energianlähteille.

Suomen hallitus ja viranomaiset ovat asettaneet tavoitteita ja kannustimia uusiutuvan energian käytön lisäämiseksi osana ilmastonmuutoksen torjuntaa. Vielä vuosina 2020–2023 yksityishenkilöt ja asunto-osakeyhtiöt pystyivät hakemaan ARA:n myöntämää energia-avustusta aurinkosähköhankkeisiin, mutta tällä hetkellä avustuksen myöntäminen on päättynyt [28]. Vuonna 2024 ainoa voimassa oleva tukimuoto on kotitalousvähennys. Näiden tekijöiden yhdistelmä on luonut suotuisan ilmapiirin aurinkoenergian ja aurinkosähköjärjestelmien yleistymiselle, ja niinpä tänä päivänä monet kotitaloudet ja yritykset ovatkin jo siirtyneet aurinkoenergiaan tai harkitsevat sitä.

Myös oman työni puolesta sähkösuunnittelijana olen huomannut, että viime vuosina sähköhintojen voimakas vaihtelu on saanut ihmiset miettimään, miten kustannuksia saadaan tasattua ja pystytään varautumaan vastaaviin tilanteisiin paremmin. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on perehtyä aurinkosähköjärjestelmän mitoitukseen ja hankintaan omakotitaloon. Tavoitteen saavuttamiseksi työssä perehdytään järjestelmän komponentteihin ja erilaisiin aurinkosähköratkaisuihin.

2 Aurinko energianlähteenä

Aurinko on erittäin voimakas energian lähde, ja se tarjoaa maapallolle valtavan määrän energiaa joka päivä. Puolentoista tunnin aikana auringosta maapallolle säteilevä energia riittäisi kattamaan koko maapallon energiantarpeen vuodeksi. Siksi onkin järkevää pyrkiä ottamaan talteen mahdollisimman paljon tätä ilmaista energiaa. Aurinkosähköjärjestelmät muuttavat auringonvalon valosähköisen ilmiön avulla sähköenergiaksi. Tätä energiaa voidaan joko käyttää suoraan tai varastoida akustoihin. [1.]

Tänä päivänä aurinkoa hyödynnetään pääasiassa aurinkosähkössä ja aurinkolämmössä. Aurinkoenergiatekniikka, kuten aurinkopaneelit ja aurinkolämpöjärjestelmät, on suunniteltu keräämään energiaa auringonsäteilystä ja muuntaamaan se käyttökelpoiseksi energiaksi. Aurinkopaneelit käyttävät aurinkokennotekniikkaa muuntamaan auringonvalon sähköksi, kun taas aurinkolämpöjärjestelmät käyttävät auringonvaloa veden tai ilman lämmittämiseen.

2.1 Aurinkosähkön lyhyt historia

Vuonna 1872 englantilainen sähköinsinööri Willoughby Smith huomasi, että seleeniini altistaminen valolle nostaa sen johtavuutta. Smithin löydöksen innostamana vuonna 1876 kaksi britannialaista tiedemiestä William Grylls Adams ja Richard Evans Day tekivät erilaisia kokeita seleenitangoilla ja saivat selville jotain ennennäkemätöntä: tankojen altistaminen valolle sai aikaan sähkövirtauksen kiinteässä materiaalissa. Adams ja Day kutsuivat tällä tavalla tuotettua sähkövirtaa nimellä "photoelectric effect". Tänä päivänä se tunnetaan kuitenkin nimellä "photovoltaic effect" eli suomeksi valosähköisenä ilmiönä. [2.]

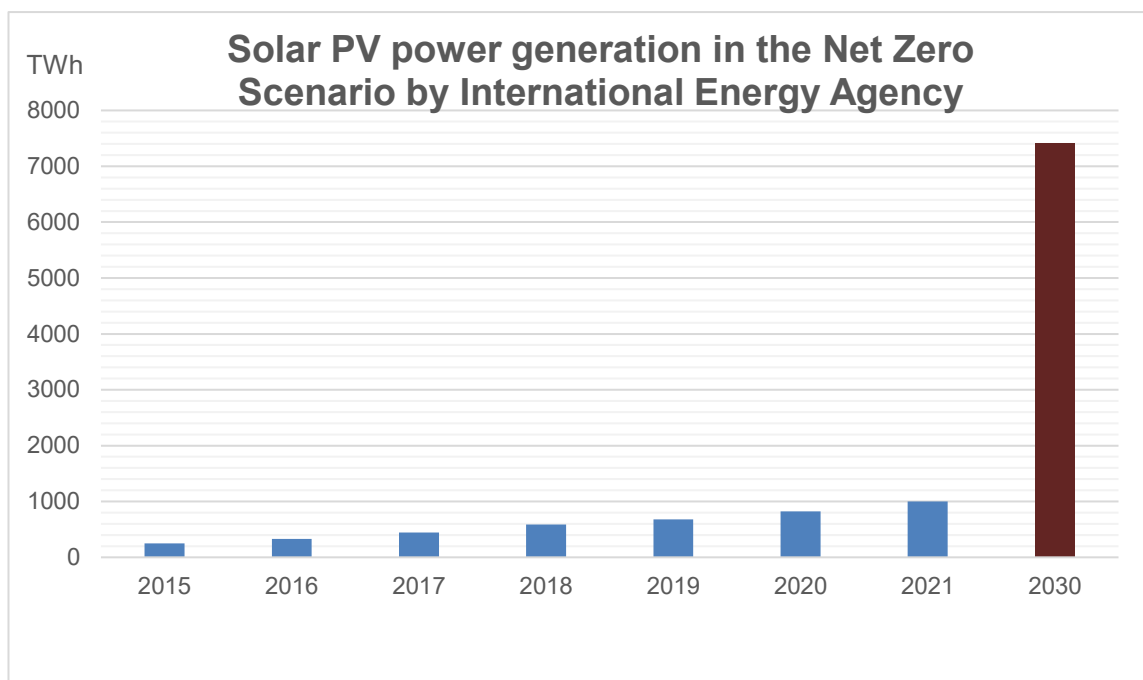
Vuonna 1880 amerikkalainen keksijä Charles Fritts rakensi seleenimoduuleita ja asetti ne testiryhmäksi katolle New Yorkissa. Fritts oli toiveikas ja uskoi, että nämä moduulit voivat kilpailla Thomas Edisonin uusien voimalaitosten kanssa. Seleenin hyötysuhde auringonvalon muuttamisessa sähköksi oli kuitenkin erittäin pieni. [2.] Kuvassa 1 on esitetty kyseinen testiryhmä.



Kuva 1. Charles Frittsin testiryhmä New Yorkissa [3].

1900-luvulla aurinkokennojen kehitystyö alkoi nopeutua. Öljykriisi ja kasvava ympäristötietoisuus lisäsivät kiinnostusta erilaisia energianlähteitä kohtaan, ja vuonna 1954 Bell Labs kehitti ensimmäisen tehokkaan piipohjaisen (Si) aurinkokennon, ja vielä tänäkin päivänä pii on yleisin aurinkokennoissa käytettävä materiaali. [4.]

Aurinkoenergian käyttö on kasvanut nopeasti ympäri maailmaa, ja monissa maissa se on jo merkittävä osa energiantuotantoa. Monet kotitaloudet ja yritykset ovat siirtyneet käyttämään aurinkosähköä sähköntuotannossa. Alla olevassa kuvassa 2 nähdään maailmanlaajuinen aurinkoenergian tuotannon määrää aikavälillä 2015–2021 ja vuoden 2030 tavoite, johon tuotanto nousee, jos Net Zero Skenario -tavoitteet täyttyvät.



Kuva 2. Aurinkosähkötuotannon ennusten IEA:n mukaan [5].

Aurinkoenergia on siis ympäristöystävällinen ja kestävä energialähde, joka tarjoaa monia etuja kotitalouksille ja yrityksille. Muuttuvassa maailmantilanteessa, jossa sähkön ostohinta voi vaihdella merkittävästi pienilläkin aikaväleillä, voi omavarainen sähköntuotanto tuoda varmuutta kotitalouksien taloudelliseen tilanteeseen. Kotitalouden aurinkosähköjärjestelmä pienentää tarvittavan ostosähkön määrää ja voi tarjota sähköä alueilla, joilla perinteistä fossiiliseen polttoaineeseen perustuvaa sähköverkkoa ei ole käytettävissä. [6.]

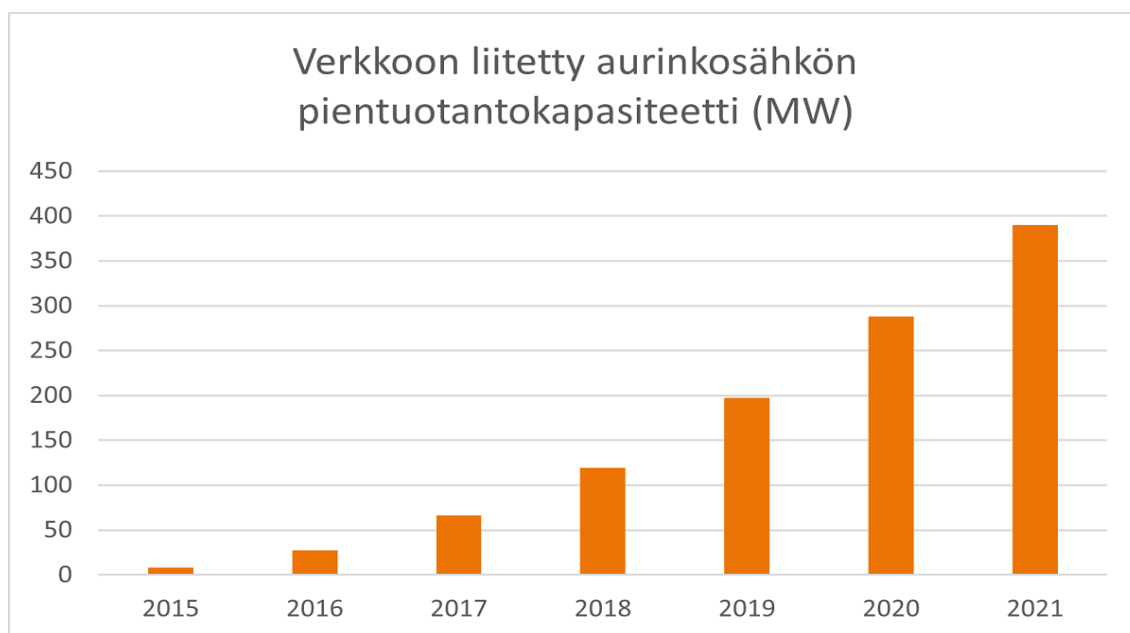
2.2 Aurinkoenergian hyödyntäminen Suomessa

Aurinkosähköjärjestelmissä tarkastellaan useimmiten auringon vuotuista kokonaissäteilyä. Se koostuu niin auringosta suoraan tulevasta säteilystä kuin pilvien, ilmakehän ja maan heijastamasta hajasäteilystä. Suomen vuotuinen säteilyn määrä vaihtelee suuresti keskiarvon ollessa Etelä-Suomessa noin 980 kWh/m² ja Pohjois-Suomessa noin 750 kWh/m². [7.]

Suomessa aurinkoenergian käyttö sähkön tuotannossa on suhteellisen uusi ilmiö ja sen osuus koko Suomen jakeluverkkoon asennetusta

tuotantokapasiteetista oli vuoden 2021 lopussa noin 2,2 %, joka koostui lähes kokonaan alle 1 megawatin (MW) pientuotantolaitteistoista. Syy miksi aurinkoenergian on Suomessa niin vähäistä, on maan pohjoinen sijainti, minkä takia auringonvalon määrä vuodessa on melko vähäinen. [8.]

Aurinkosähkön tuotantokapasiteetti kuitenkin kasvaa huomattavaa vauhtia, ja Fingrid arvioi, että tuotantokapasiteetti yli kymmenkertaistuu nykyisestäään eli kasvaa noin 7000 megawattiin vuoteen 2030 mennessä. Vuonna 2023 Kalajoelle valmistui Suomen suurin aurinkovoimala, joka tuottaa 11 gigawattituntia vuodessa. Kalajoen voimalaa ennen kyseistä titteliä oli pitänyt hallussaan Seinäjoen Nurmossa sijaitseva Atrian aurinkopuisto, jonka tuotantokapasiteetti on 9 gigawattituntia vuodessa. Nykymittakaavassa Kalajoen aurinkovoimala on suuri, mutta sitä huomattavasti suurempia hankkeita on Suomessa jo suunnitteilla. [9.] Verkkoon liitetyn pientuotantokapasiteetin määrän kasvu on havainnollistettu kuvassa 3.

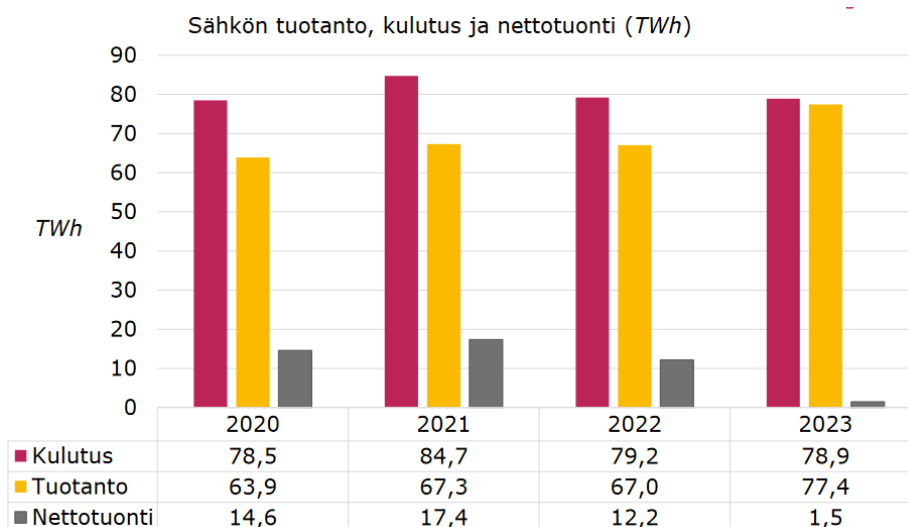


Kuva 3. Verkkoon liitetty aurinkosähkön pientuotantokapasiteetti [10].

Kuten kuvasta 3 ilmenee, aurinkosähkön tuotanto kasvaa Suomessa vuosi vuodelta. Aurinkosähkötöknologian hintaa pienenee, mikä tekee siitä kannattavampaa sekä yksityisille että yrityksille. Lisäksi teknologia on myös kehittynyt ja

tämän ansiosta energiaa saadaan hyödynnettyä tehokkaammin myös heikommassa valo-olosuhteissa.

Vaikka aurinkosähkön osuus Suomen sähköntuotannosta on vielä melko pieni, on sillä potentiaalia olla tulevaisuudessa iso osa sitä. Jatkuva kehitystyö ja investointi aurinkosähkөөn auttavat Suomea olemaan tulevaisuudessa kestävä kehityksen mallimaa ja omavarainen sähkötuottaja. Kuvassa 4 on havainnollistettu sähkön nettotuonnin kehitys.



Kuva 4. Sähkön tuotanto, kulutus ja nettotuonti [11].

2.3 Eri järjestelmät ja sovellukset

Aurinkosähkőjärjestelmiä voidaan käyttää ja asentaa monella eri tavalla. Aurinkopaneeleja voidaan asentaa esimerkiksi pellolle tai joutomaalle ja rakentaa suuritehoisia aurinkopaneelikenttiä, josta energiaa voidaan myydä eteenpäin sähköyhtiölle. Aurinkopaneeleita voidaan myös asentaa yksityisten ja julkisten rakennusten katoille sekä seinille, jolloin niillä tuotettu sähkö voidaan käyttää suoraan kiinteistön omaan sähkökulutukseen ja ylijäämä-sähkö voidaan halutessa myydä eteenpäin sähköyhtiölle. Täytyy kuitenkin huomioida, että sähkön syöttäminen verkkoon on kielletty, ellei sähkölle ole ostajaa. Ylijäämä-sähkön siirto sähköverkkoon vaatii sopimuksen sähkömyyjän kanssa. [12].

Aurinkopaneeleita voidaan myös asentaa sähköautoihin ja matkailuautoihin, jolloin saadaan tuotettua niiden tarvitsemille sähkölaitteille energiaa. Ilmailu- ja avaruusteknologiassa aurinkopaneelit ovat olleet jo kauan käytössä ja niitä hyödynnetään esimerkiksi satelliiteissa.

Aurinkosähköjärjestelmiä voidaan kytkeä erilaisilla tavoilla. Voimala voidaan kytkeä toimimaan vain kodin omassa sähköverkossa (Off-Grid), jolloin energiaa varastoidaan yleensä akustoihin eikä ylijäävää energiaa voi siirtää yleiseen sähköverkkoon. On-Grid eli yleiseen sähköverkkoon kytketty järjestelmä toimii muuten samalla tavalla, mutta tässä järjestelmässä ei välttämättä tarvitse akkuja, koska käyttämättä jäävän energian voi siirtää sähköverkkoon ja sähköyhtiö voi maksaa tästä energiasta tehdyn sopimuksen mukaisesti. [13.]

2.4 Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä

Verkkoon kytketty aurinkosähköjärjestelmä on nimensä mukaisesti sähkönjakeluverkossa kiinni oleva järjestelmä. Se on Suomessa yleisin aurinkosähköjärjestelmä. Tähän järjestelmään kuuluvat aurinkopaneelit, tarvittavat invertterit, kaapelointi, kaksisuuntainen kulutusmittari ja muut tarpeelliset kytkimet sekä asennustarvikkeet. Suojalaitteet ja tasavirtapiirin turvakytkin ovat järjestelmässä pakollisia, mutta ne on yleensä integroitu invertteriin. Mikäli invertteri ei sisällä tarpeellisia suojauksia, ne on asennettava erikseen. Kodin oman järjestelmän sähköistämisen lisäksi pystytään ylimenevä tuotanto syöttämään jakeluverkkoon, josta sähkömyyjä hyvittää tuotetun energian määrän. [13.] Kuvassa 5 on havainnollistettu verkkoon kytketyn järjestelmän rakenne ja komponentit.



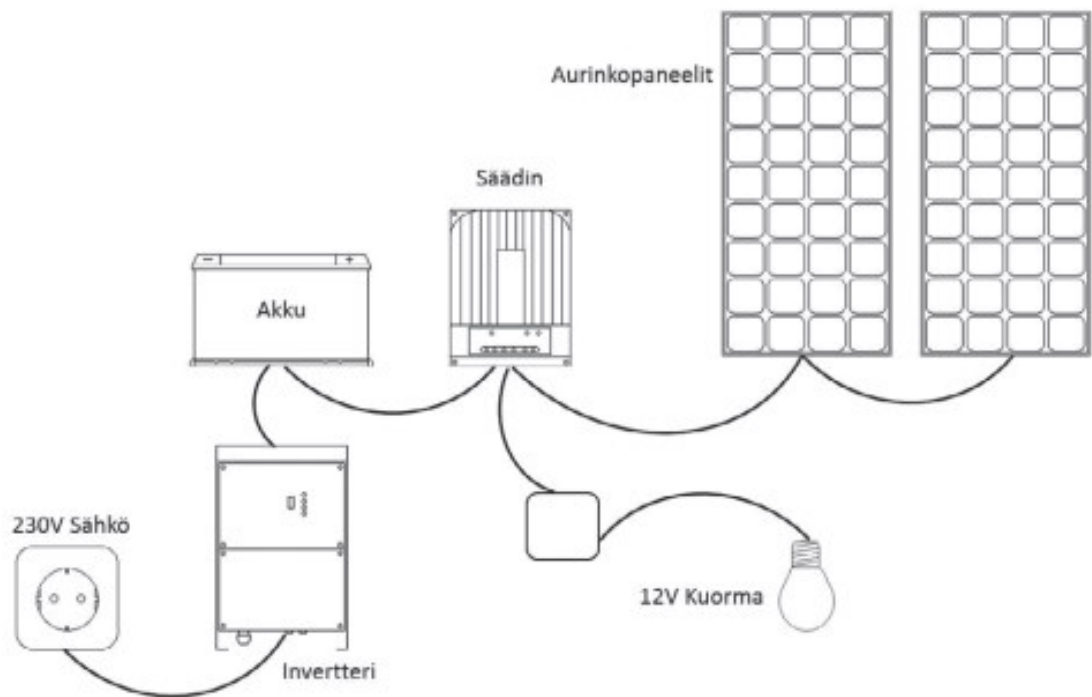
Kuva 5. Verkkoon kytketyn pientalon aurinkosähköjärjestelmän kokoonpano [13].

Verkkoon liitetyn järjestelmän hyötyjä on, että järjestelmä ei tarvitse akustoja, jotka usein ovat järjestelmän kalleimpia komponentteja. Järjestelmä mahdollistaa myös ylimääräisen energian myynnin takaisin sähköyhtiölle. Kun aurinkosähköjärjestelmä tuottaa enemmän energiaa kuin mitä käytetään, ylimääräinen energia siirretään takaisin verkkoon. Ylituotannon siirto takaisin sähköverkkoon vaatii kaksisuuntaisen energiamittarin, sekä sopimuksen sähkönmyyjän kanssa. Energiamittari on sähkönjakeluverkonhaltijan vastuulla, joten aurinkosähköjärjestelmän käyttäjän ei tarvitse huolehtia mittarin hankinnasta. Takaisin verkkoon siirrettävä sähkö mitataan, ja sähkön myyjä hyvittää sen lähes poikkeuksetta Nord Pool -sähköpörssin Suomen hinta-alueen toteutuneella tunti hinnalla. Sähkön takaisin myynnistä saadut hyödyt eivät kuitenkaan välttämättä ole suuret, ja järjestelmät pyritäänkin mitoittamaan yleensä niin, että kaikki tuotettu sähkö saataisiin kulutettua mahdollisimman hyvin itse. [13.]

Verkkoon kytketyillä aurinkosähköjärjestelmillä, joissa ei ole akustoja, tai varavirtajärjestelmää on kuitenkin joitain rajoituksia. Ensinnäkin ne ovat riippuvaisia sähköverkon toimivuudesta, eivätkä siksi toimi varavirtalähteenä sähkökatkon aikana. Invertterissä täytyy olla sisäänrakennettu ominaisuus, joka tunnistaa sähköverkon tilan ja katkaisee virran, kun sähköverkko lopettaa toimintansa. Tämä ominaisuus on tärkeä järjestelmän turvallisuuden ja verkon vakauden kannalta. [13.]

2.5 Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä

Verkkoon kytkemätön aurinkosähköjärjestelmä on järjestelmä, joka on suunniteltu toimimaan sähköverkosta riippumattomasti. Nämä järjestelmät koostuvat yleensä aurinkopaneeleista, lataussäätimestä, akustosta ja invertteristä. Verkkoon kytkemättömässä järjestelmässä aurinkopaneelit varastoivat tuotetun sähkön yleensä ensin akustolle. Akusta voidaan ottaa virtaa suoraan tasavirtaa käyttäville laitteille. Jos tasavirtaa halutaan muuttaa vaihtovirraksi, tarvitsee järjestelmään lisätä invertteri, kuten verkkoon kytketyssä järjestelmässä. Säädin hallinnoi sähkövirtaa ja varmistaa, että akku ei ylikuormitu tai vahingoitu. [14, s. 148.] Kuvassa 6 on havainnollistettu Off-Grid-järjestelmän toimintaperiaate.



Kuva 6. Periaatekuva Off-Grid-järjestelmästä [15, s. 51].

Off-Grid-järjestelmät ovat yleensä sopivia kohteisiin, joissa ei ole mahdollisuutta liittyä sähköverkkoon tai joissa sähköverkko ei ole luotettava. Näitä ovat esimerkiksi mökit, asuntovaunut, veneet ja saaret. Järjestelmät voivat olla myös hyödyllisiä paikoissa, joissa on useasti sähkökatkoksia.

Järjestelmän mitoittaminen on erittäin tärkeää, jotta vältetään ylimääräisiltä kustannuksilta mahdollisten laajennusten osalta. Näissä järjestelmissä yleisimmin on vaarana alimitoitus. On myös tärkeä huomioida, että pienistä tai keskikokoisista Off-Grid-järjestelmistä ei välttämättä saa otettua suuria tehoja. Varsinkin isompiin kohteisiin, kuten mökit tai omakotitalot, Off-Grid-järjestelmän suunnittelu ja asennus vaativat ammattitaitoa. Järjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon useita tekijöitä, kuten energian käytön tarve, auringonvalon määrä ja aurinkopaneelien sijoitus. [15, s. 51–55.]

Jos esimerkiksi mökillä, jossa on Off-Grid-aurinkosähköjärjestelmä asutaan ympäri vuoden tai muuten energiankulutus on huomattavaa, ei pelkkä aurinkosähköjärjestelmä riitä kattamaan energiankulutusta. Tällaisissa kohteissa on käytännössä järjestelmään välttämätöntä liittää vähintään aggregaatti ja mahdollisesti tuulivoimala. Näillä toimenpiteillä saadaan energia yleensä riittämään ympäri vuoden. Aggregaatti on myös hyvä lisäys järjestelmään, jossa tarvitaan hetkellisiä suuria tehoja esimerkiksi työkoneiden käyttöä varten. [15, s. 51–55.] Kuvassa 7 on havainnollistettu erilaisten järjestelmäkokonaisuuksien ominaisuuksia.

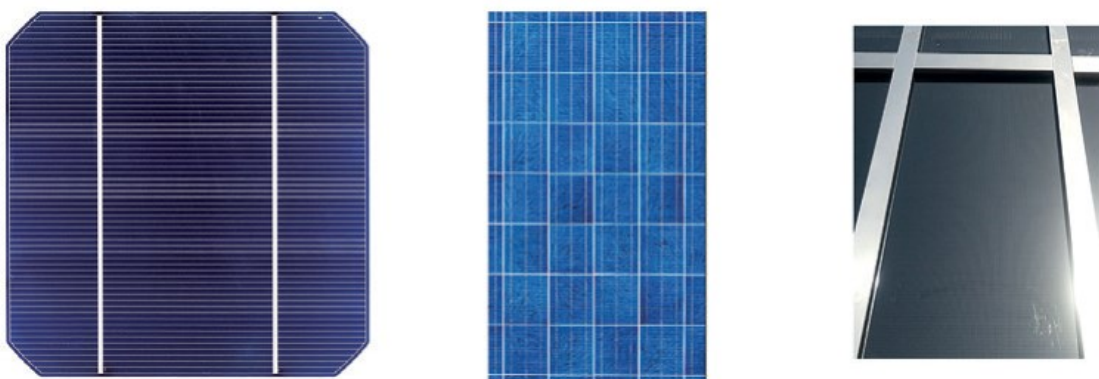
JÄRJESTELMÄN LAITTEET				JÄRJESTELMÄN OMINAISUUDET	
Minimi aurinkosähkö	Suuri akusto ja invertteri	Aggregaatti	Tuulimylly	Syötön jatkuvuus (varavoima)	Suuren tehon syöttö
×				Heikko: kunnes akut tyhjä	Heikko: Suuritehoisia laitteita (yli 2 300 W) ei voi käyttää yleensä ollenkaan.
×	×			Heikko/kohtalainen: riippuu siitä, miten paljon akkuja ostetaan ja mitkä ovat kulutukset	Heikko/kohtalainen: Normaaliin pistorasiaan kytkettävät laitteet toiminevat kaikki, mutta laitteiden yhteiskäyttö voi olla rajoittunutta.
×		×		Kohtalainen: kunnes akut ja polttoaine loppuvat.	Hyvä: Aggregaatti on (kustannus)tehokkain keino saada hetkelliset suuret tehot käyttöön esimerkiksi työkoneessa.
×			×	Hyvä: Tuulimyllyn avulla energiaa saadaan "aina". Pienellä akustolla katkoksia voi syntyä.	Heikko: Tuulimyllyn vaikutusta ei pysty huomioimaan suurten tehojen kannalta.
×		×	×	Hyvä: Laaja järjestelmä, joka on varmistettu monin tavoin.	Hyvä: Aggregaatilla suuren tehon saaminen on aina varmistettu.
€€	€€€	€	€€€€		

Kuva 7. Erilaisten järjestelmäkokonaisuuksien toiminta [15, s. 52].

3 Aurinkosähköjärjestelmän komponentit

3.1 Aurinkopaneelit

Aurinkopaneelit ovat laitteita, jotka muuntavat auringonvalon sähköenergiaksi. Ne koostuvat useista sarjaan kytketyistä aurinkokennoista, jotka on yleensä kapseloitu ilmatiiviisti lasin alle. Kuvassa 8 on esitetty yleisimmät aurinkopaneelityypit.



Kuva 8. Erityyppisiä paneeleita vasemmalta oikealle yksikiteinen, monikiteinen ja ohutkalvopaneeli [15, s. 12].

Aurinkokennojen kaupallisissa sovelluksissa käytetään yleisimmin yksi- ja monikiteisiä piikkenoja. Niiden lisäksi ohutkalvotekniikoissa hyödynnetään yleisimmin amorfista piitä sekä CIGS- ja CdTe-kennoja. Näiden lisäksi orgaaniset aurinkopaneelit, jotka hyödyntävät uudentyyppisiä, hiilipohjaisia materiaaleja ovat herättäneet paljon kiinnostusta. Jokaisella eri materiaalilla on omat etunsa ja ominaisuutensa, joiden takia ne soveltuvat erityyppisiin ratkaisuihin eri tavoin. [15, s. 12.]

Markkinoille on myös viime vuosina tullut rakennukseen integroituja ratkaisuja. Toisin kuin perinteisessä järjestelmässä, jossa aurinkopaneelit on esimerkiksi asennettu erillisillä kiinnikkeillä katolle, integroiduissa ratkaisuissa BIVP (Building-integrated photovoltaics) -paneelit on asennettu suoraan rakennuksen kattoon tai julkisivuun. Rakennukseen integroituja järjestelmiä saa monina

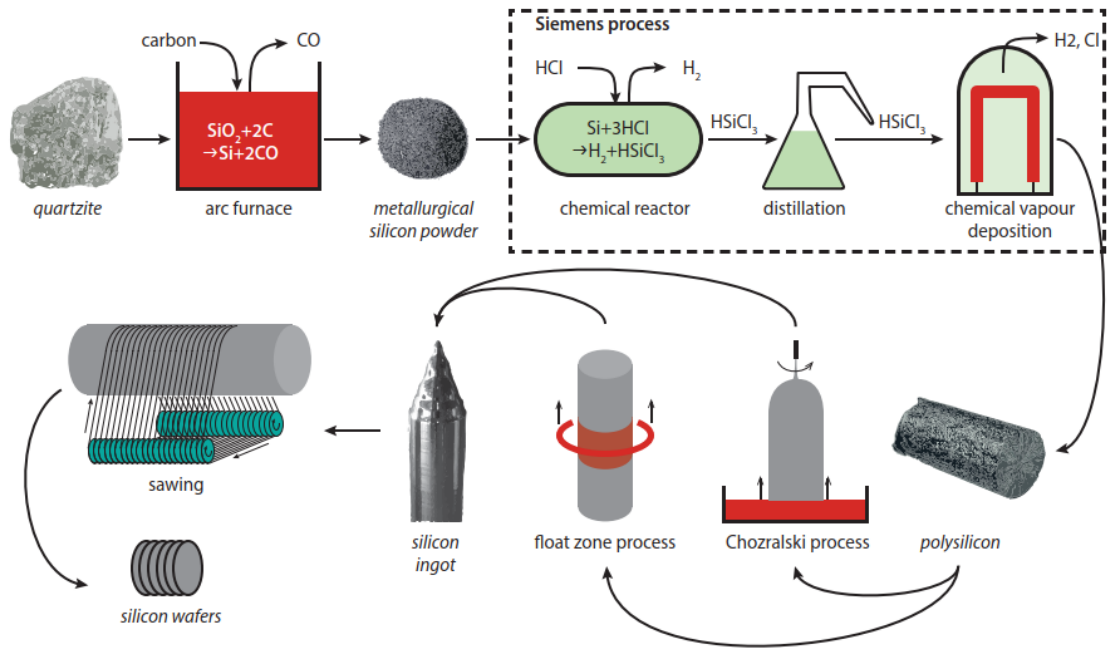
erillaisina ratkaisuin. [16.] Kuvassa 9 on esitetty eri aurinkopaneelityyppien ominaisuuksia.

Ominaisuudet	Kiteinen pii		Ohutkalvo			Orgaaninen
	Monikiteinen	Yksikiteinen	Amorfinen pii	CIS/CIGS	CdTe	
Hyötysuhde (%)	13–16 %	15–20 %	5–10 %	7–16 %	7–16 %	3–5 %
Lämpötilan vaikutus (STC) tehoon (% / +1 °C)	–0,42	–0,40	–0,1...–0,3	–0,35...–0,40	–0,25...–0,36	...
Mekaaninen kestävyys	hauras	hauras	joustava	joustava	joustava	joustava
Varjostus	herkkä	herkkä	sietää	sietää	sietää	sietää
Käyttökä (vuotta)	yli 30	yli 30	yli 30	yli 30	yli 30	0,5–3
Hinta	€€	€€€	€€€	€€€	€€€	€

Kuva 9. Yleisten kennotyyppien ominaisuudet [15, s. 12].

3.1.1 Yksikideaurinkopaneelit

Yksikideaurinkopaneelit ovat markkinoiden suosituin aurinkopaneelityyppi koti- ja liikekiinteistöjen aurinkovoimaloissa, ja ne ovat myös paneelityypeistä suorituskykyisimmät. Yksikideaurinkopaneelit valmistetaan nimensä mukaan yhdestä piikiteestä, joka leikataan ohuiksi piikiekoiksi, joista sitten muodostetaan kennoja ja paneeleita. Näissä paneeleissa käytetään yleensä erittäin puhdasta piitä. Raaka-aineen puhtaus ja yksikiderakenne mahdollistavat aurinkopaneelin korkean hyötysuhteen. Yksikideaurinkopaneelien valmistusprosessi on monimutkaisempi ja kalliimpi verrattuna muihin aurinkopaneelityyppeihin, kuten monikide- tai ohutkalvopaneelisiin. [18.] Kuvassa 10 on havainnollistettu piikiekon valmistusprosessi.



Kuva 10. Piikiekon valmistusprosessi [17, s. 146].

Yksikideaurinkopaneelien hyödyt ovat:

- Yksikideaurinkopaneelien hyötysuhde on korkein kaikista aurinkopaneelityypeistä, yleensä 15–20 %. Tämä tarkoittaa sitä, että ne voivat tuottaa enemmän sähköä neliometriä kohden verrattuna muihin paneelityyppeihin. Ne suoriutuvat myös paremmin matalissa valo-olosuhteissa verrattuna muihin paneelityyppeihin.
- Yksikideaurinkopaneelit ovat tilatehokkain aurinkopaneelityyppi, mikä tarkoittaa, että ne tarvitsevat vähemmän kattotilaa saman määrän sähköntuottamiseen verrattuna muihin tyyppisiin.

Yksikideaurinkopaneelien huonot puolet ovat:

- Yksikideaurinkopaneelien valmistus on kalliimpaa kuin muiden aurinkopaneelityyppien, mikä vaikuttaa niiden korkeampiin kustannuksiin. [18.]

3.1.2 Monikidepaneelit

Yksikiteisen piin valmistuksessa syntyvästä leikkuu- ja hiontajätteestä voidaan valmistaa monikiteistä piitä. Kerätty jäte sulatetaan ja kiteytetään haluttuun muotoon ja tästä syystä materiaalia kutsutaan monikiteiseksi. Prosessissa piin kiderakenteeseen muodostuu kidevirheitä. Kidevirheet pienentävät kennojen hyötysuhdetta, sillä ne voivat estää elektronin poistumisen kidevirheen alueelta. Monikideaurinkopaneelit ovat kustannustehokas vaihtoehto muille paneelityypeille, koska niiden valmistus on halvempaa kuin esimerkiksi yksikideaurinkopaneelien. [19.]

Monikideaurinkopaneelien edut ovat:

- Monikideaurinkopaneelien valmistus on halvempaa, johtuen paneelien yksinkertaisemmasta valmistusprosessista.
- Monikide aurinkopaneelien hyötysuhde on hyvä (13–16 %), vaikkakin se on pienempi kuin yksikiteisillä aurinkopaneeleilla. Monikiteiset paneelit ovat hyvä vaihtoehto talouksille, joissa halutaan säästää hankintakustannuksissa.

Monikideaurinkopaneelin huonot puolet ovat:

- Monikideaurinkopaneeleissa on huonompi hyötysuhde verrattuna yksikidepaneeleihin.
- Monikideaurinkopaneelit voivat tarvita enemmän tilaa verrattuna yksikidepaneeleihin. [19.]

3.1.3 Ohutkalvoaurinkopaneelit

Ohutkalvoaurinkopaneelit ovat viime vuosina nostaneet suosiotaan vaihtoehtona perinteisille yksi- ja monikideaurinkopaneeleille. Näiden paneelien valmistukseen tarvitaan vähemmän materiaalia verrattuna perinteisiin paneeleihin, mutta käytettyjen materiaalien takia niiden hinta ei ainakaan vielä ole halvempi. Ohutkalvopaneelit ovat perinteisiin paneeleihin verrattuna kevyempiä ja niiden rakenteen ansiosta taipuisia. Tästä syystä niitä on myös helpompi asentaa erilaisiin rakenteisiin. [20.]

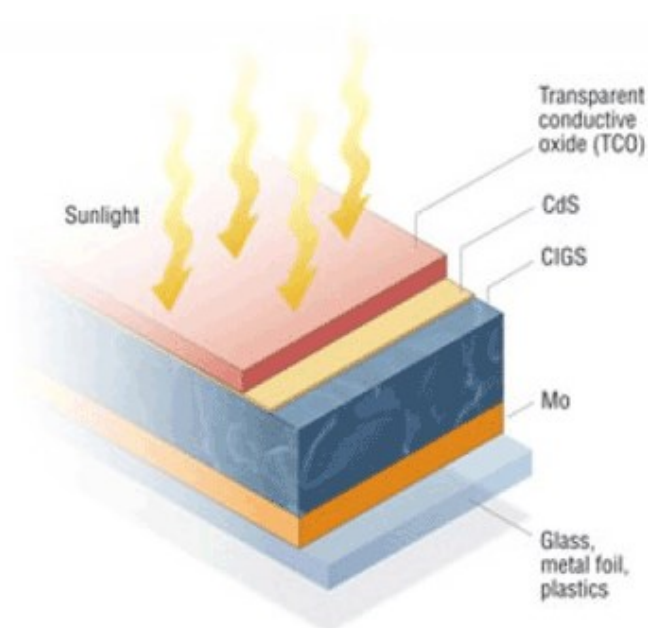
Ohutkalvoaurinkopaneelit käyttävät nimensä mukaan ohutta valosähköistä materiaalikerrosta eli kalvoa muuttaakseen auringon säteilyä sähköksi. Toisin kuin perinteiset aurinkopaneelit, jotka käyttävät piipohjaisia aurinkokennoja, ohutkalvopaneelit käyttävät useampia erilaisia materiaaleja. Yleisimpiä käytettyjä materiaaleja ovat amorfiset piit sekä CIGS- (Copper-Indium-Gallium-Selenide) ja CdTe (Cadmium telluride) -kennot. Ohutkalvoaurinkopaneeli valmistetaan asentamalla vähintään yksi tai useampi kerros valosähköistä materiaalia alusmateriaalille, joka voi esimerkiksi olla lasia, muovia tai metallia. Valosähköinen kerros voi olla ainoastaan yhden mikronin tai 0,001 millimetrin paksuinen. [20.] Kuvassa 11 on havainnollistettu CIGS-ohutkalvoaurinkopaneelin rakenne.

Ohutkalvoaurinkopaneelien edut ovat:

- Ohutkalvoaurinkopaneelit käyttävät huomattavasti vähemmän materiaalia verrattuna perinteisiin aurinkopaneeleihin.
- Ohutkalvoaurinkopaneelit ovat kevyitä ja taipuisia, mikä tekee niistä helpompia asentaa erilaisille pinnoille. Ne voidaan asentaa esimerkiksi kaarevalle pinnalle, suoraan rakennuksen pintaan tai niillä pystytään myös helposti rakentamaan siirrettävä aurinkosähköratkaisu.

Ohutkalvoaurinkopaneelien huonot puolet ovat:

- Yksi isoin haittapuoli verrattuna perinteisiin piipohjaisiin aurinkopaneeleihin on ohutkalvopaneelien pienempi hyötysuhde, joka on 5–17 % riippuen käytetystä materiaalista. [20.]



Kuva 11. CIGS-ohutkalvoaurinkopaneelin rakenne [20].

3.2 Kaapelointi

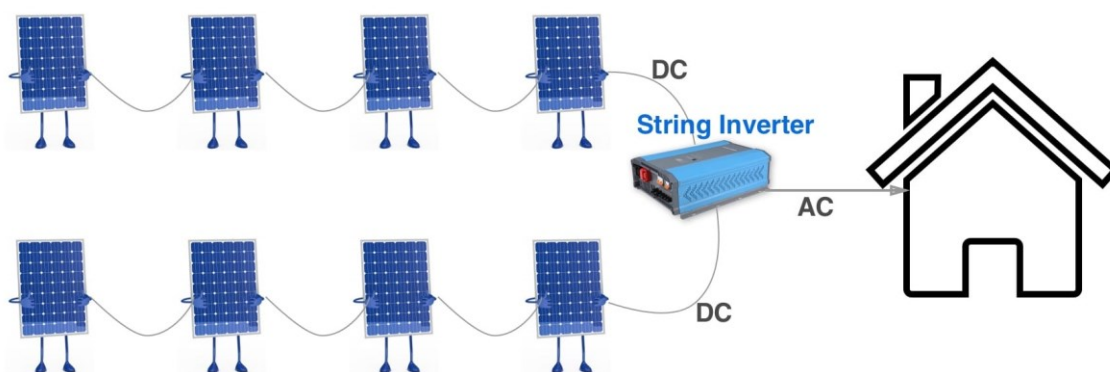
Aurinkopaneelijärjestelmän kaapelointi on tärkeä osa järjestelmän toimivuutta ja turvallisuutta. Kaapeloinnin toteutus ja suunnittelu vaativat huolellisuutta ja tarkkuutta, sillä virheellisesti toteutettu kaapelointi voi aiheuttaa pahimmassa tapauksessa hengenvaarallisia turvallisuusriskejä.

Kaapelin valintaan vaikuttaa järjestelmän teho, etäisyys aurinkopaneeleista invertteriin ja asennuspaikka. Johtimet voidaan yleensä mitoittaa valmistajan laskehtaohjelmalla tai taulukolla. Kaapeloinnin testaus ja huolto ovat myös tärkeitä tehtäviä aurinkopaneelijärjestelmän toimivuuden varmistamisessa. Testauksessa mitataan kaapelin resistanssi, jännitehäviö ja eristysvastus. Huollossa kaapelointi tulee tarkastaa säännöllisesti, ja esimerkiksi talven jälkeen on pinta-kaapelointi hyvä tarkastaa mahdollisten vioittuneiden kaapeleiden tai liittimien varalta. Oikein toteutettu aurinkopaneelijärjestelmän kaapelointi varmistaa järjestelmän turvallisen ja tehokkaan toiminnan sekä pitkän käyttöiän. [15, s. 64–65; 128; 152.]

3.3 Vaihtosuuntaaja eli invertteri

Vaihtosuuntaaja eli invertteri on olennainen osa aurinkoenergiajärjestelmää. Sen tehtävänä on muuntaa aurinkopaneelien tuottama tasavirta (DC) vaihtovirraksi (AC), jota voidaan käyttää kotitalouden laitteiden virtalähteenä ja syöttää verkkoon. Suomessa invertteri kytketään sähköverkkoon jakeluverkkoyhtiön mittarin jälkeen kiinteistön kulutuslaitteiden rinnalle. Kytkentä tehdään yleensä aurinkopaneelista lähimpänä olevaan sähkökeskukseen. Tällaisella kytkennällä järjestelmästä tulee yksinkertainen ja edullinen. Invertteri voidaan asentaa talon ulkoseinään tai sisälle. Ulos asentaessa pitää kuitenkin huomioida laitteen IP-luokitus ja takuuehdot, joissa toimintalämpötilan alaraja on yleensä -25 astetta. [14, s. 142–148.]

Kotitalouksissa käytetyissä järjestelmissä yleisin vaihtosuuntaajatyyppejä on ketjuinvertteri (string inverter) ja hieman harvinaisempia yleensä paneelin taakse asennettavat mikroinvertterit (microinverter). Ketjuinvertteri on suunniteltu muuntamaan sarjaan kytketyn paneeliston tasavirta vaihtovirraksi. Ketjuinvertterit ovat olleet käytössä jo kauan ja ne on todettu luettaviksi. Tämä onkin yksi syy niiden suosioon. [13.] Kuvassa 12 on havainnollistettu ketjuinvertterin kytkentä.

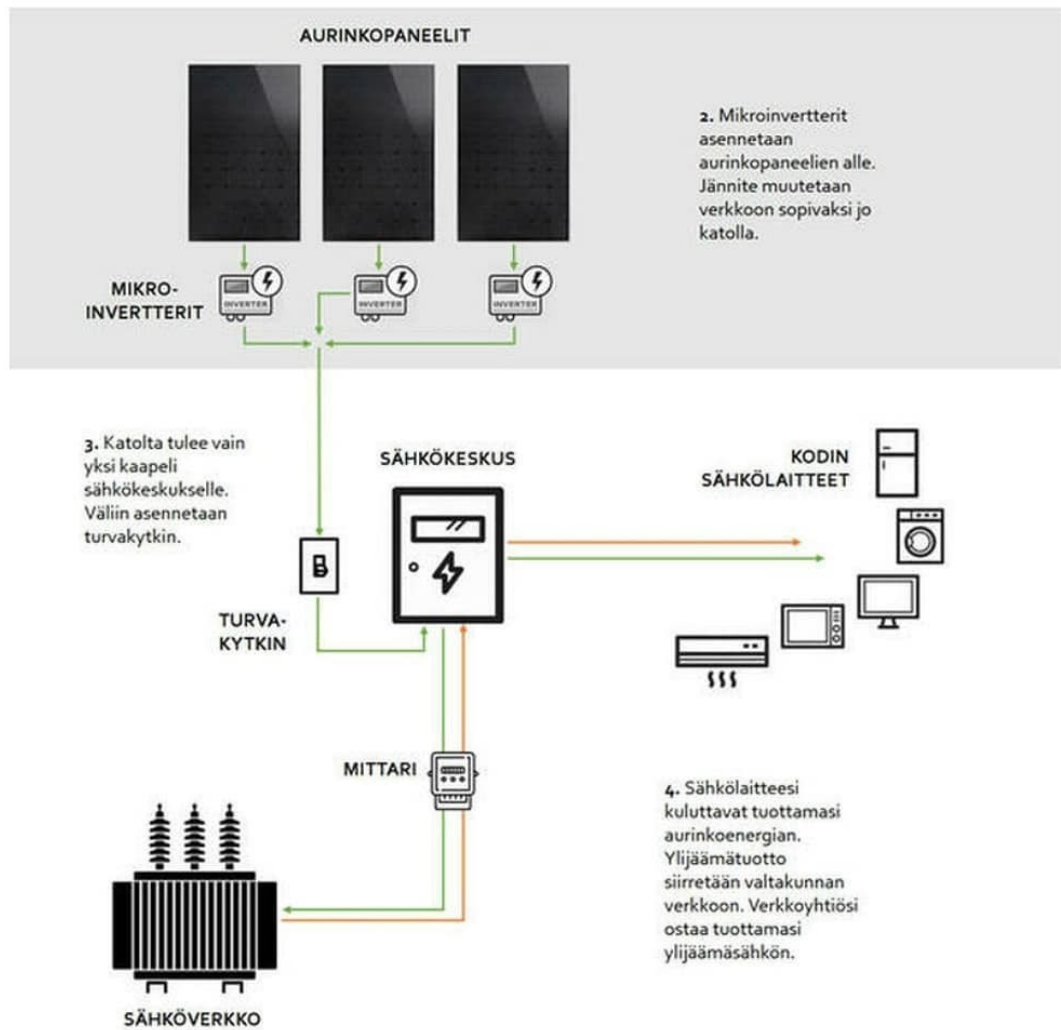
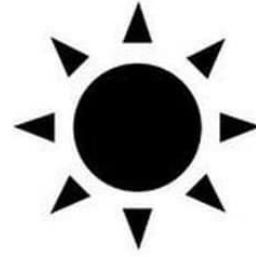


Kuva 12. Keskusinvertterin kytkentä [21].

Mikroinvertterit ovat pienempiä inverttereitä, jotka on kiinnitetty erikseen jokaiseen aurinkopaneeliin. Mikroinvertterit mahdollistavat paremman hyötysuhteen ja energiantuotannon, koska esimerkiksi yhden paneelin jääminen varjoon ei vaikuta yhtä paljon koko järjestelmän sähköntuotantoon. Mikroinvertterit ovat suhteessa kalliimpia kuin tavalliset invertterit, mutta ovat parempi vaihtoehto esimerkiksi katoille, joihin muodostuu varjostuksia. Järjestelmää, jossa käytetään mikroinverttereitä, on myös helpompi laajentaa, koska jokaisella aurinkopaneelilla on oma invertteri, toisin kuin ketjutetussa järjestelmässä, jossa invertteri täytyy kokonaan vaihtaa, jos järjestelmää laajennetaan. [14, s. 142–148.]

Tasavirtaoptimoijat ovat ketjuinvertterin ja mikroinvertterin välimalli. Ne maksimoivat paneelien tehoa MPPT-säätimen tavoin. Mikroinvertterin tapaan ne on asennettu erikseen jokaiseen aurinkopaneeliin ja toimivat paremmin silloin, kun osa järjestelmän paneeleista on varjon peitossa. Tasavirtaoptimoijien lisäksi järjestelmään täytyy lisätä vielä invertteri, jos tasavirta halutaan muuttaa vaihtovirraksi. [14, s. 142–148.] Kuvassa 13 on havainnollistettu mikroinvertterijärjestelmä ja sen toimintaperiaate.

1. Auringon kokonaissäteily koostuu auringosta suoraan tulevasta säteilystä ja hajasäteilystä. Hajasäteily on ilmakehän ja pilvien heijastamaa säteilyä sekä maasta heijastuvaa hajasäteilyä. Suomessa hajasäteilyn osuus kokonaissäteilystä on merkittävä.



Kuva 13. Mikroinvertterin toimintaperiaate [22].

3.4 Lataussäädin

Jos järjestelmässä käytetään akustoja aurinkoenergian varastointiin tai energiaa halutaan tiettyinä aikoina ohjata esimerkiksi lämminvesivaraajalle tai muille laitteille, tarvitsee järjestelmään lisätä lataussäädin. Sen päätehtävänä on optimoida latausprosessi akustolle varmistaen, että akut latautuvat tehokkaasti ja turvallisesti. Lataussäädin valvoo aurinkopaneelien tuottaman virran määrää ja jännitettä sekä säätää näitä parametreja tarpeen mukaan. Näin se varmistaa, että akut eivät yli- tai alilataudu, mikä voi vahingoittaa niitä tai lyhentää niiden käyttöikää. Modernit aurinkosähköjärjestelmän lataussäätimet on usein varustettu älykkäillä toiminnoilla, kuten MPPT (Maximum Power Point Tracking) -tekniikalla, joka optimoi aurinkopaneelien tuottaman virran muuntamisen tehokkaasti akuston lataukseen. [14, s. 147–148.]

3.5 Akustot

Verkkoon kytkemättömissä järjestelmissä, esimerkiksi mökeillä, täytyy järjestelmässä olla akusto, koska muuten sähkö ei olisi saatavilla auringon laskettua (järjestelmä ilman aggregaattia). Perinteisesti aurinkosähköakut ovat olleet lyijy-akkuja, mutta tänä päivänä litiumakustot yleistyvät nopeasti niiden hintojen laskun ansiosta. Verkkoon kytkemättömän aurinkosähköjärjestelmän akustolta toivottuja piirteitä ovat pitkä elinikä, alhainen itsepurkaus, vähäinen huollontarve ja hyvä hyötösuhde. [23.]

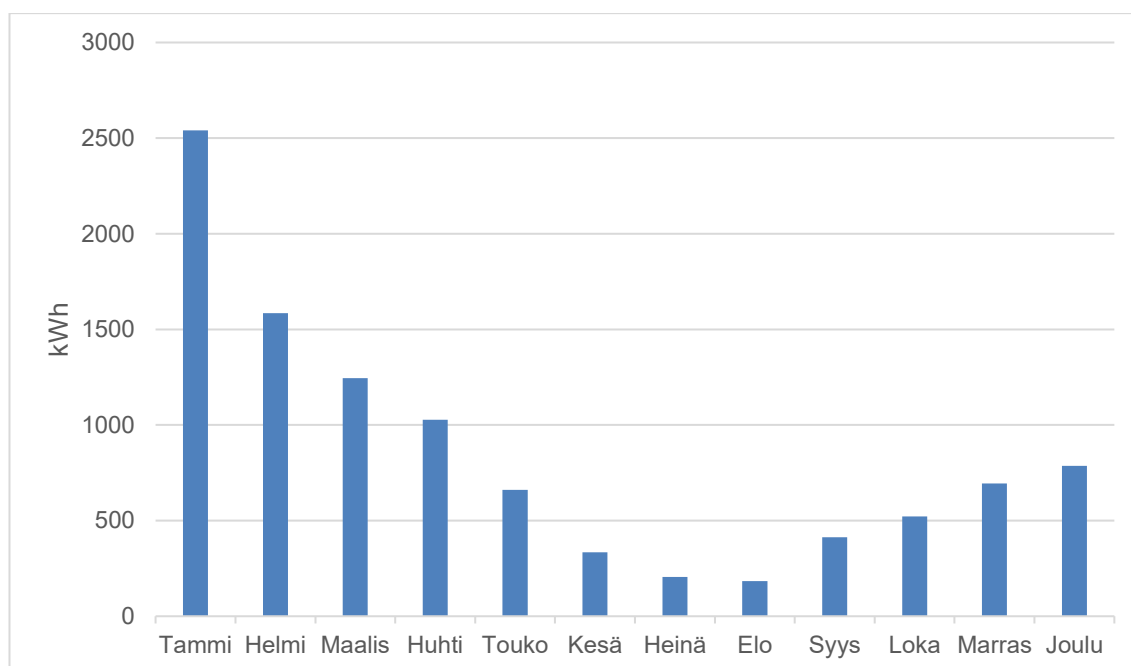
Verkkoon kytketyissä aurinkosähköjärjestelmissä akustot ovat ainakin toisiksi harvinaisia, koska akustot ovat kalliita verrattuna verkkosähkön käyttöön. Litium-akustojen hintojen odotetaan kuitenkin laskevan edelleen ja niiden odotetaan yleistyvän myös sähköverkkoon kytkettyjen aurinkosähköjärjestelmien yhteydessä. [23.]

4 Aurinkosähköjärjestelmän suunnittelu

4.1 Mallikohde

Mallikohteena toimii omakotitalo, joka on ympärivuotisessa käytössä. Talo on noin 20 vuotta vanha perinteinen suomalainen hirsitalo. Suurin osa kohteen sähkönkulutuksesta syntyy sähkölämmityksestä, ilmalämpöpumpusta ja jääkaappi-pakastimesta. Kohteessa on puusauna ja talvisin talon lämmityksessä hyödynnetään myös puutakkaa.

Kiinteistön kulutustietoihin perehtymällä saadaan selville, että tuntikohtainen keskikulutus vuonna 2022 oli 1,16 kWh. Suurin tuntikohtainen sähkönkulutus oli 11,47 kWh, joka saavutettiin 6.1.2022. Kiinteistön vuosikulutus oli yhteensä 10 195 kWh. Kuvassa 14 on havainnollistettu kiinteistön kuukausikohtainen sähkönkulutus.

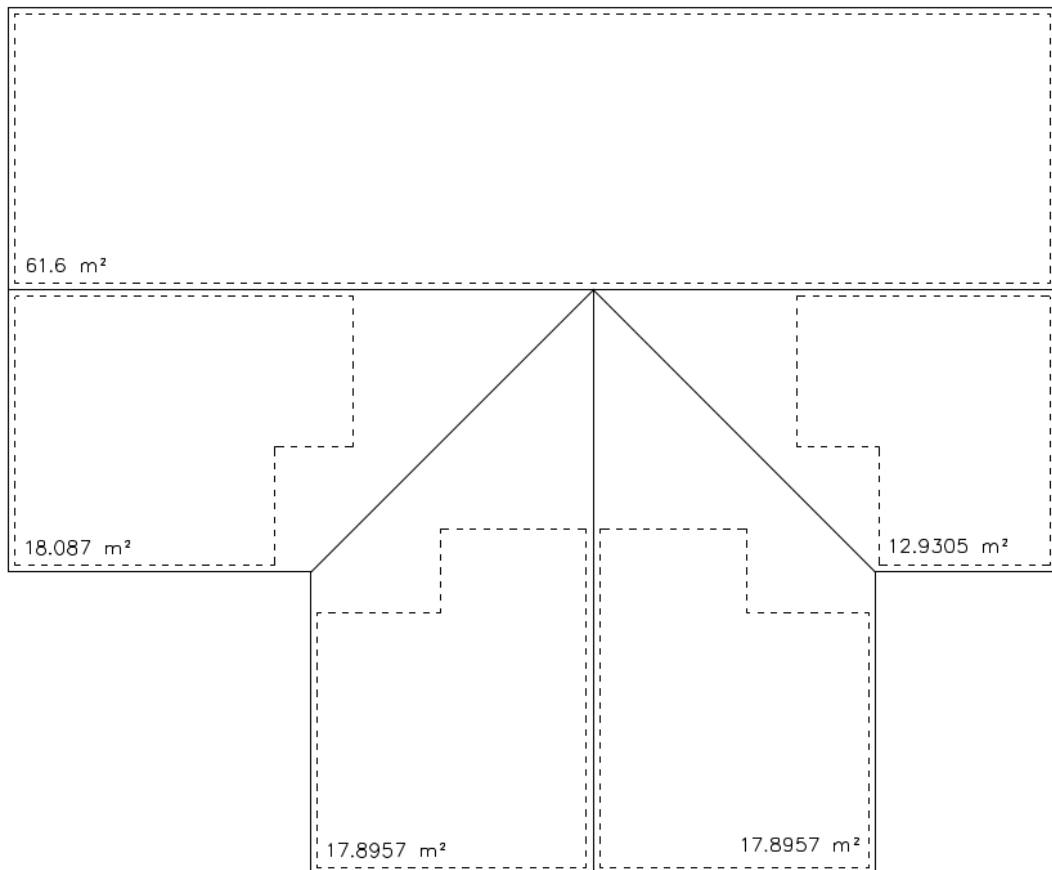


Kuva 14. Kuukausittainen sähkönkulutus vuoden aikana.

Kattopinta-alaa rakennuksessa on 210 m² ja katon kaltevuus on 26°. Tästä pinta-alasta aurinkopaneeleille käytettävää alaa on 128 m². Kohteessa on

laskettu sopiva pinta-ala aurinkopaneeleille käyttäen 400–430 Wp:n aurinkopaneelin keskiarvoista kokoa, joka on 1134 mm x 1722 mm. Tämä koko on valittu, koska se vastaa markkinoilla yleisesti myynnissä olevia aurinkopaneeleita.

Rakennuksen vesikattokuvasta on mitoitettu alueet, joihin tämän kokoisia aurinkopaneeleita voidaan asentaa. Hyödynnettävän alueen mitoituksessa tulee ottaa huomioon katolla oleva savupiippu ja mahdolliset iv-päätelaitteet. On myös huomioitava se, että pohjoiseen osoittava katto ei ole aurinkopaneeleille optimaalinen paikka ja käytännössä tällä alueelle paneeleita ei kannata sijoittaa, koska se saa vähemmän suoraa auringonvaloa verrattuna etelään suuntautuvaan lappeeseen. Pohjoiseen suuntautuvalle lappeelle osuva aurinko on heikompa ja epäsäännöllisempää, mikä vähentää aurinkopaneelien tuottoa. Kuvassa 15 on havainnollistettu aurinkopaneelien asennukseen soveltuvat alueet vesikatolla.



Kuva 15. Talon vesikattokuva ja aurinkopaneeleille sopivat alueet.

4.2 Aurinkosähköjärjestelmän mitoitus

Järjestelmästä saatavan hyödyn maksimoimiseksi on hyvä tehdä sen mitoitus huolella. Tavoitteena on, että aurinkosähköjärjestelmällä tuotetulla sähköllä saataisiin korvattua mahdollisimman paljon aiemmin ostettua sähköä. Suomessa kuitenkin talvikuukausina auringonvalon määrä on niin vähäistä, että ilman järjestelmän huomattavaa ylimitoitusta ei esimerkiksi tammikuussa päästä suuriin säästöihin.

Kohteen aurinkosähköjärjestelmä pyritään mitoittamaan niin, että lähtökohtaisesti tuotosta mahdollisimman suuri osa saadaan hyödynnettyä talon omassa kulutuksessa ja sähköverkkoon myytävä osa jää mahdollisimman pieneksi kokonaistuotantoon verrattuna. Mitoitukseen voi myös vaikuttaa käytettävä pinta-ala tai jo ennestään katolla olevat laitteet. Keskeistä mitoituksessa on, että pääosa tuotetusta energiasta saadaan hyödynnettyä itse. Tämän järjestelmän mitoituksessa tähdätään siihen, että aurinkoenergialla saadaan korvattua noin 30–40 % vuoden kokonaissähkökulutuksesta. [12.]

Ostettavan sähkön korvaamisesta itsetuotetulla aurinkosähköllä saadut hyödyt ovat suuremmat kuin sähköyhtiölle myydystä sähköstä saatavat hyödyt. Sähkönmyyjät hinnoittelevat ostosähkön yleensä sähköpörssissä tunneittain noteeratun Spot-hinnan mukaan. Silloin sähköntuottaja saisi myymästään sähköstä suunnilleen saman hinnan, mitä siitä joutuisi maksamaan. Täytyy kuitenkin muistaa, että sähköenergiasta saatavat myyntitulot eivät sisällä sähkönsiirron ja verojen osuutta. Toisin sanoen myydystä sähköstä saadut tulot ovat vain 1/3 verrattuna siihen, mitä ostetusta sähköstä maksetaan. Kuvassa 16 havainnollistetaan sähkön osto- ja myyntihinnan rakenne. Kuvassa vertaillaan hyötyjä, joita syntyy vältettäessä sähkön ostoa verkosta ja myytäessä itse tuotettua sähköä verkkoon. Myyntiin liittyvät kulut sisältävät veroja sekä mahdollisen myyntimarginaalin, joka riippuu sähkönmyyjästä. Lisäksi jakeluverkkoyhtiö voi periä pien-tuottajan verkkoon syöttämästä sähköstä verkkopalvelumaksua korkeintaan 0,07 c/kWh. [12.]

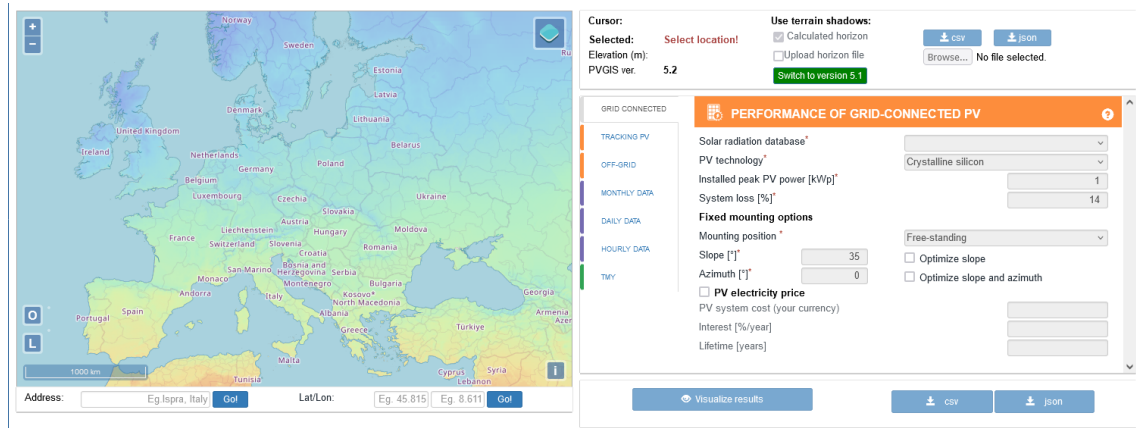


Kuva 16. Sähkön osto- ja myyntihinna rakenne [12].

Seuraavissa alaluvuissa tutustutaan tässä työssä aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa käytettävään Euroopan komission PVGIS-työkaluun. Aluksi esitellään PVGIS-työkalun ominaisuudet ja toimintaperiaatteet. Tämän jälkeen sovelletaan PVGIS-työkalua konkreettisesti ja mitoitetaan kohteeseen sopivan kokoinen järjestelmä sekä tutustutaan saatuihin tuloksiin.

4.2.1 PVGIS-työkalu

PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) on verkkopohjainen työkalu, jonka avulla pystytään arvioimaan auringonsäteilyn määrää ja aurinkopaneelijärjestelmien suorituskykyä ympäri maailmaa. Työkalu pystyy tarjoamaan erilaisia tietoja esimerkiksi auringonsäteilyn määrästä ja energian tuotosta eri vuoden- ja kellonaikoihin. Kuvassa 17 on esitetty PVGIS työkalun verkkosivu.



Kuva 17. PVGIS-työkalu [24].

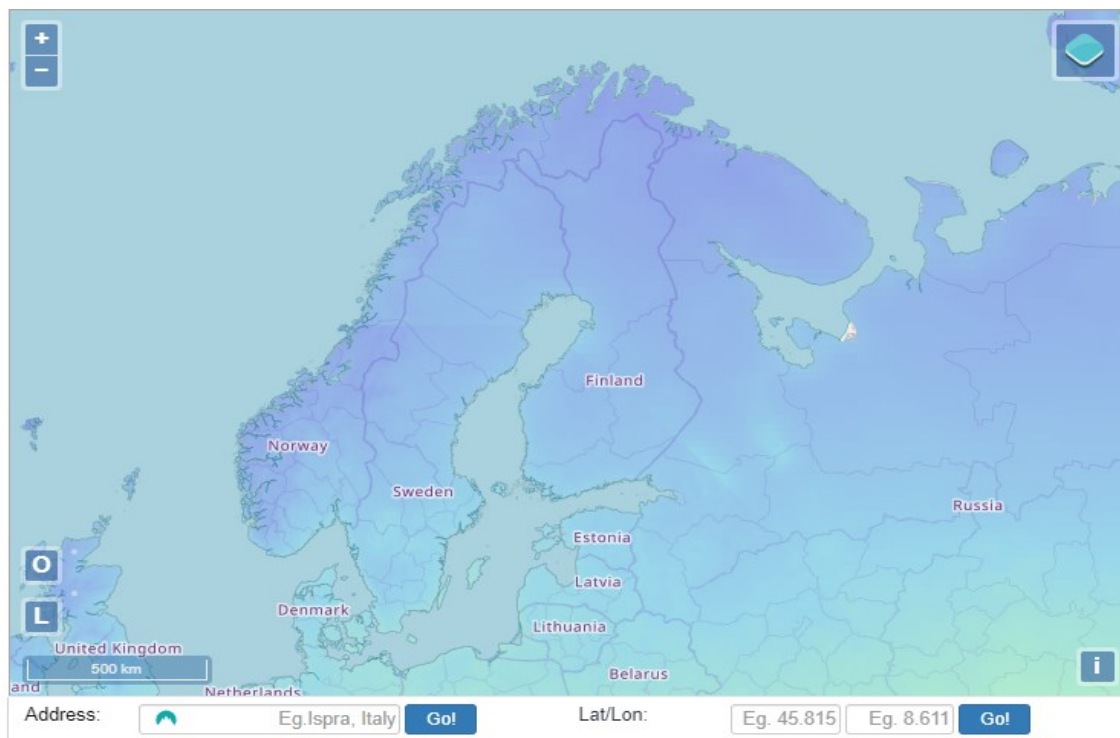
Järjestelmän mitoittamisen näkökulmasta tärkein ominaisuus on PVGIS:n tarjoama laskentatyökalu, jotka auttavat käyttäjää optimoimaan aurinkopaneelien tehonvalinnan ja suuntauksen. Työkalu antaa tietoa aurinkopaneelien optimaalisesta asennuskulmasta ja suuntauksesta, mikä vaikuttaa suoraan aurinkopaneelien energian tuotantoon. Näiden tietojen avulla käyttäjä voi mitoittaa aurinkovoimalan parhaalla mahdollisella tavalla.

PVGIS hyödyntää ilmastotietoja, kuten pilvisyyttä ja säteilytasoa sekä maaston muotoja ympäri maapalloa aurinkoenergian tuoton laskemiseksi. PVGIS:n on kehittänyt Euroopan komissio, ja se on saatavilla verkossa ilmaiseksi käytettäväksi. Työkalu on hyödyllinen niin aurinkoenergian asiantuntijoille, sähkösuunnittelijoille kuin myös yksittäisille kuluttajille, jotka harkitsevat aurinkopaneelijärjestelmän asentamista kotiinsa tai yritykseensä. On myös tärkeä muistaa, että työkalun antamat tulokset pohjautuvat tietokannasta saatuihin mallinnuksiin, ja sen tuloksen ovat suuntaa antavia. Todellinen aurinkoenergian tuotanto voi hieman vaihdella eri tekijöiden, kuten pilvisyyden tai muuttuvien ilmasto-olosuhteiden vuoksi. [24.]

4.2.2 Aurinkosähköjärjestelmän tuoton mallinnus

Ensimmäisenä ohjelmaan syötetään rakennuksen sijainti. Sijainnin voi määrittää paikkakunnalla, koordinaateilla tai kartasta visuaalisesti valitsemalla.

Rakennuksen sijainnin perusteella laskuri pystyy arvioimaan auringon tulokulman ja katolle kohdistuvan valon määrän kuukauden aikana. Kuvassa 18 on havainnollistettu työkalun karttaosio, johon rakennuksen sijainti määritellään.



Kuva 18. PVGIS-työkalun kartta [24].

"Installed peak PV power [kWp]" -kohtaan syötetään haluttu aurinkopaneelijärjestelmän teho, joka mitataan kilowatteina (kWp). Tämä vaihe on tärkeä, sillä se määrittelee, kuinka paljon aurinkoenergiaa järjestelmä pystyy tuottamaan optimaalisissa olosuhteissa. Paneelitehoa suunniteltaessa on hyvä ottaa huomioon kohteen vuosittainen ja kuukausittainen sähkönkulutus, joihin vertailemalla voidaan alkaa mitoittamaan sopivankokoista järjestelmää.

Tavoitteena on valita järjestelmän teho siten, että se tuottaa riittävästi energiaa kohteen tarpeisiin vuosittain. Samalla on kuitenkin tärkeää minimoida ylimääräisen energian tuotantoa, jotta järjestelmä olisi mahdollisimman tehokas ja taloudellisesti kannattava. Kuten tässä työssä aiemmin todettiin, järjestelmän mitoituksessa pyritään siihen, että aurinkoenergialla saadaan katettua 30–40 % vuosittaisesta energiankulutuksesta.

"System loss [%]" -kohtaan arvioidaan invertterin, kaapeleiden ja muiden aurinkosähköjärjestelmän osien mahdolliset häviöt. Tämä vaihe on olennainen, sillä se vaikuttaa suoraan järjestelmän kokonaistehokkuuteen. Lisäksi tähän kohtaan voidaan sisällyttää arviot varjostusten aiheuttamista häviöistä, mikäli se on relevanttia kohteen kannalta.

Ohjelma ehdottaa automaattisesti 14 %:n häviötä, mikä on kohtuullisen tarkka arvio. Se ottaa huomioon roskien, lumen sekä muiden mahdollisten varjostusten todennäköisyyden. Kuvassa 19 on havainnollistettu työkalun osa, johon valitaan haluttu tietokanta, aurinkopaneelityyppi, asennettu huipputeho ja järjestelmähäviö.

PERFORMANCE OF GRID-CONNECTED PV

Solar radiation database*	PVGIS-SARAH2
PV technology*	Crystalline silicon
Installed peak PV power [kWp]*	4,2
System loss [%]*	14

Kuva 19. PVGIS-työkalun suorituskyky osa [24].

"Mounting position" -kohtaan valitaan, miten paneelit asennetaan katolle. Vapaasti seisova tarkoittaa, että paneelit asennetaan telineisiin, joissa ilmavirtaus kulkee vapaasti paneelien alla. Kattoon asennettu tai rakennukseen integroitu tarkoittaa ratkaisua, jossa paneelit ovat kiinnitettynä kattoon tai seinään tai jossa niiden kiinnikkeet ovat niin matalat, että ne estävät ilmavirtauksen paneelien takana. Tutkimukset ovat osoittaneet, että jos ilmavirtausta paneelien takana rajoitetaan, voivat paneelit lämmitä merkittävästi, jopa 15°C, kun auringonvalo on 1000 W/m². Lämpötilan noustessa aurinkopaneelinen tuotanto laskee ja heikosti tuulettuvissa rakenteissa energiantuotanto voi pudota jopa 30 %, riippuen paneelityypistä. [24.]

Paneelien lämpötilan nousun varalta ja paremman tehotuotannon kannalta valitaan kohteeseen vapaasti seisova asennus. Paneelien ja katon välissä tulisi

olla vähintään 10 cm:n tuuletusrako, ja kilpailutuksen tai laitteiston hankinnan aikana täytyy varmistua, että laitetoimitukseen sisältyy tähän sopivat kiinnikkeet. Riittävä rako paneelien ja asennuspinnan välillä auttaa myös siihen, ettei sulava lumi ja jää muodosta paneeliston alle patoja, jotka voivat vahingoittaa kaapelointeja ja paneeleja. [15, s. 148.]

”Slope” on aurinkopaneelien kulma vaakatasoon nähden kiinteässä asennuksessa. Työkalu pystyy myös laskemaan automaattisesti optimaalisen kulman kohteeseen. Suomessa tehokkain kallistuskulma on noin 35–45 astetta. Pienemmällä kallistuskulmalla saavutetaan parempi kausihuippu keskikesällä, koska aurinko paistaa tällöin korkeammalta. Taas mitä lähemmäksi siirrytään pystykulmaa sitä enemmän paneelit tuottavat sähkö keväällä ja syksyllä.

Tässä kohteessa harjakaton kulma on 26 astetta, joten valitaan se myös tähän laskelmaan. Syy tähän on puhtaasti esteettinen. Katon kulman mukaisesti asennetut paneelit eivät erotu katolta yhtä selvästi kuin esimerkiksi 45 asteen kulmaan asennetut paneelit. Myös PVGIS-työkalulla vertailemalla näiden asennuskulmien tehontuoton eroa selviää, että sillä ei ole suurta vaikutusta koko vuoden tuotantoon. 26 asteen asennuskulmalla vuosittainen energiantuotto on 3548 kWh ja 45 asteen asennuskulmalla tuotto on 3666 kWh. [24.]

”Azimuth”- eli suuntauskulmasarakkeeseen ilmoitetaan poikkeama etelästä. -90° tarkoittaa itää, 0° etelää ja 90° länttä. Myös suuntauskulman optimaalisen arvon työkalu pystyy laskemaan automaattisesti. Tässä kohteessa paneelit asennetaan jo olemassa olevalle katolle, joten se on määräävä arvo. Kohteen katto osoittaa suoraan etelään, joten asennuskulma on 0 astetta. Kuvassa 20 on havainnollistettu työkalun kohta, johon paneelien asennustapa ja kulmat syötetään.

Fixed mounting options

Mounting position *

Free-standing

Slope [°] *

26

 Optimize slope

Azimuth [°] *

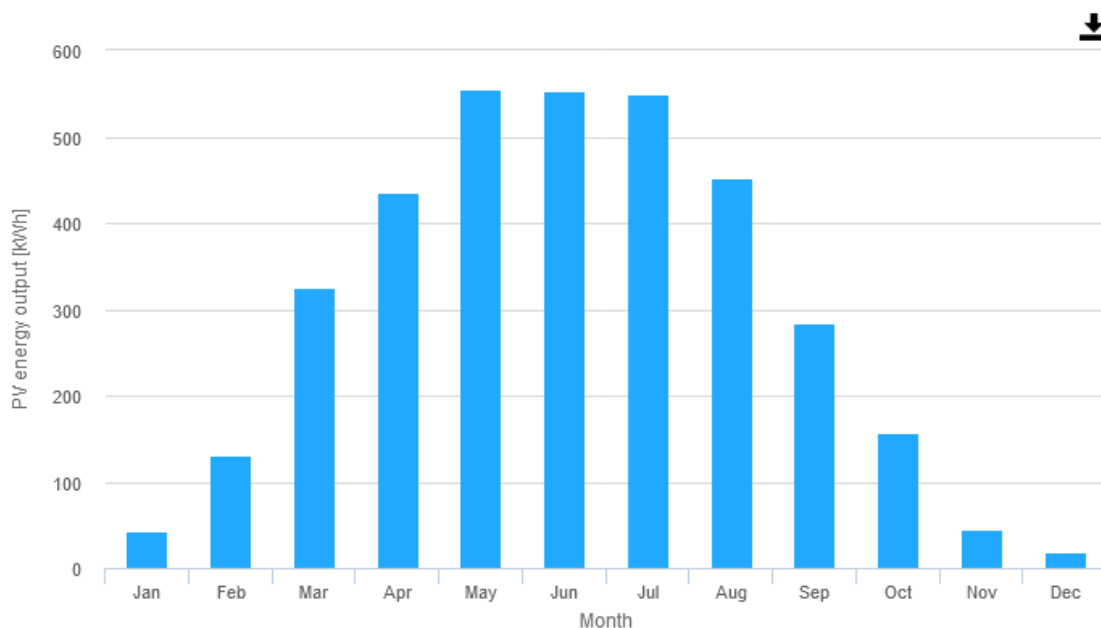
0

 Optimize slope and azimuth

Kuva 20. PVGIS-työkalun paneelin asennusvalikko [24].

Harjakattoisissa kohteissa kannattaa paneelit asentaa eteläpuoleiselle lappelle, jos mahdollista. Jos kohteessa katon lappeet osoittavat itään ja länteen, on järkevintä jakaa paneelit molemmille lappeille. Näin saadaan paneeleiden tuottamaa energiaa jaettua tasaisesti päivän ajaksi. Itä-länsisuuntaisella harjakatolla voidaan myös ottaa huomioon, mihin ajankohtaan kiinteistön suurin sähkönkulutus osuu. Aurinkopaneeleille on myös olemassa asennustelineitä, jotka kääntävät paneeleita auringonsäteilyn tulosuunnan mukaan. Nämä laitteet ovat kuitenkin kalliita ja helpommin vioittuvia kuin kiinteät telineet. [15, s. 18–20.]

Tässä vaiheessa on sovellukseen annettu kaikki tarvittavat tiedot. Painetaan "Visualize results" -painiketta, ja ohjelma antaa laskentatulokset. Ohjelmisto antaa kohteeseen simuloitut tulokset, joista selviää muun muassa kuukausikohtainen ja vuosittainen energiantuotanto, kohteeseen kohdistuva säteily neliometriä kohden, vuosittainen vaihtelu energiantuotossa ja tuottoon vaikuttavia muita arvoja. Kuvassa 21 on havainollistettu työkalun antama kuukausittainen tehontuotto.



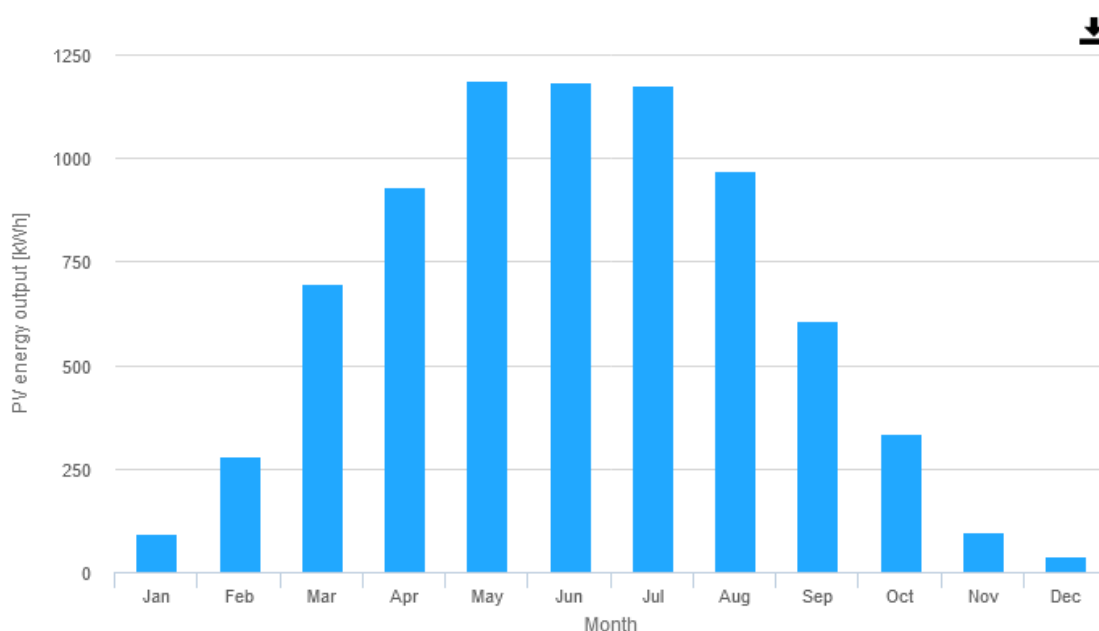
Kuva 21. Työkalun antama kuukausittainen energiantuotto annetuilla arvoilla [24].

Laskelmien tuloksiin kuuluvat vuoden keskiarvot energiantuotannossa ja suoraan vaakatasossa tapahtuvassa auringonsäteilyssä. Näiden lisäksi PVGIS raportoi vuosittaisen vaihtelun aurinkosähkön tuotannossa sekä yleiskatsauksen erilaisista menetyksistä aurinkovoiman tuotannossa eri tekijöiden vaikutuksesta. Kuvassa 22 on havainnollistettu ohjelman antamat simuloitut tulokset.

Simulation outputs:	
Slope angle [°]:	26
Azimuth angle [°]:	0
Yearly PV energy production [kWh]:	3548.66
Yearly in-plane irradiation [kWh/m ²]:	1065.2
Year-to-year variability [kWh]:	197.94
Changes in output due to:	
Angle of incidence [%]:	-3.37
Spectral effects [%]:	NaN
Temperature and low irradiance [%]:	-4.55
Total loss [%]:	-20.68

Kuva 22. Tiedot, joista selviää muun muassa vuosikohtainen energiantuotto [24].

Tässä kohteessa järjestelmän tuottoa ja kiinteistön kulutusta vertailemalla todetaan optimiksi asennetuksi huipputehoksi 4–5 kWp. Vaikka katolle pystyisikin asentamaan yli 5 kWp:n järjestelmän, ei se tässä kohteessa ole tarpeellista, koska tuotettu sähkö halutaan pääasiassa käyttää itse. Vaikka järjestelmän huipputeho nostettaisiin yli 5 kWp:n, ei suurimpien kulutuskuukausien (tammi-kuu–maaliskuu) tuotanto silti nouse huomattavasti vähäisen auringonvalon takia. Vertailun vuoksi voidaan laskea 9 kWp:n järjestelmän energiantuotto. Kuvassa 23 on havainnollistettu tehontuotto, jos järjestelmälle asetetaan 9 kWp:n huipputeho.

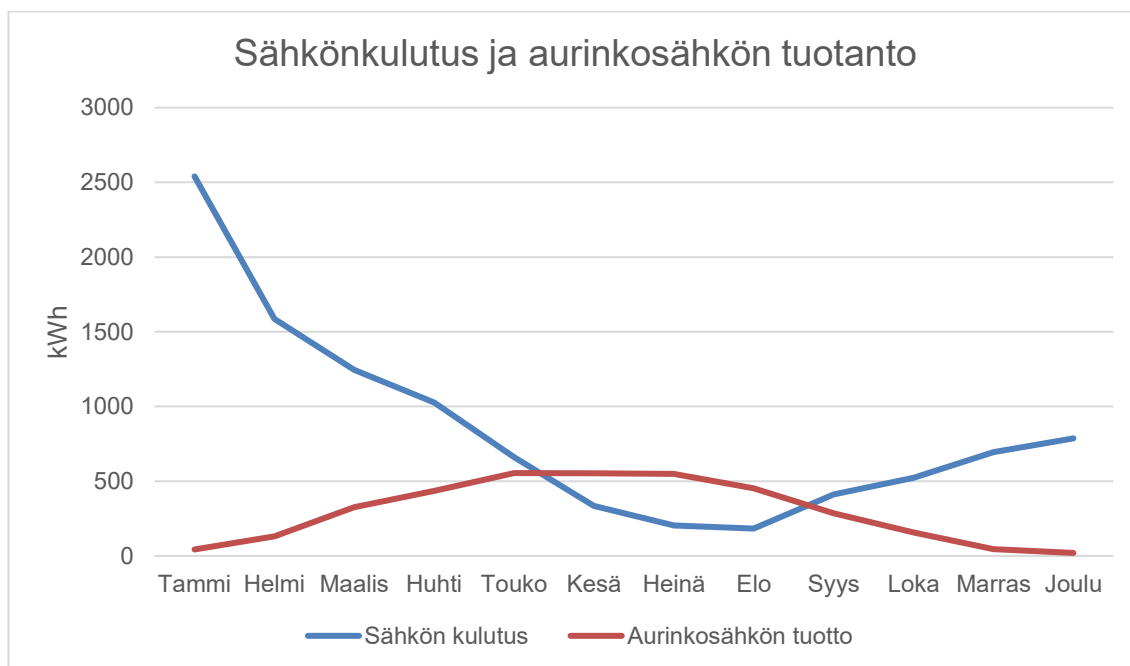


Kuva 23. Tehontuotto 9 kWp:n järjestelmällä [24].

Kuten kuvaajasta huomataan, ei järjestelmän tehon nosto vaikuta tuottoon huomattavasti talvikuukausien aikana. Kesäkuukausina taas energiantuotto nousee suurimmillaan 500 kWh:lla, jolloin kiinteistön energiankulutus on pienimmillään.

Järjestelmää suunniteltaessa voidaan myös halutessa varautua järjestelmän laajentamiseen asentamalla suuritehoisempi invertteri. Tästä asiasta löytyy hie- man ristiriitaisia suosituksia. Osa alan ammattilaisista suosittelee, että invertteri mitoitetaan tarkasti asennettavalle paneelimäärälle, koska

aurinkosähköurakassa isoimmat kustannukset syntyvät yleensä asennustöistä ja invertteristä. Kohteeseen tarjouksia pyytäessä osa laitetoimittajista taas suosittelee ylimitoitettua invertteriä. Hyvänä ohjeena onkin, että jos tietää talouden sähkönkulutuksen tulevan kasvamaan lähitulevaisuudessa, kannattaa koko järjestelmä mitoittaa sen mukaan. Kuvassa 24 on vielä havainnollistettu sähkönkulutus ja aurinkosähkön tuotanto 4,2 kWp:n järjestelmällä.



Kuva 24. Kulutuksen ja tuoton vertailu 4,2 kWp:n järjestelmällä.

4.3 Järjestelmän valinta ja kilpailutus

Aurinkosähköjärjestelmän valitsemisessa kuluttajalla on erilaisia vaihtoehtoja. Tavalliselle kuluttajalle paras vaihtoehto luultavasti on ottaa valmis avaimet käteen -paketti. Markkinoilla on myös paljon valmiita paketteja, joihin sisältyy kaikki tarvittavat komponentit kiinnitystelineistä kaapelointeihin saakka. Täytyy kuitenkin muistaa, että sähkötöiden tekeminen vaatii yrityksen tai henkilön, jolla on sähköasennusoikeudet. Paneelien asentamiseen katolle ei erityisiä lupia tarvita.

Monelle kuluttajalle järjestelmän kustannukset ovat varmasti asia, joka yleensä hankinnassa mietityttää. Siksi myös aurinkosähköjärjestelmän niin kuin muidenkin järjestelmien kanssa kannattaa urakka kilpailuttaa hyvin. Tätä kohdetta varten vertaillaan kolmea eri järjestelmää. Kohteeseen pyydettiin tarjoukset kahdelta eri yritykseltä ja vertailuksi valittiin asennusvalmis paketti jälleenmyyjältä.

4.3.1 Tarjous A

Yritys A tarjoaa kohteeseen aurinkosähköjärjestelmän, joka tuottaa 3,36 kWp:n tehon ja jonka hinta asennettuna on 7590 euroa. Pakettiin kuuluu kahdeksan 420 Wp:n N-tyyppin täysin mustaa lasi-lasi-paneelia. Yritys lupaa paneeleille 50 vuoden odotetun eliniän, ja niillä on 30 vuoden tehontuotto- ja tuotetakuu. Paneelit on valmistettu sekä suunniteltu Euroopassa. Paneelit valmistetaan 100-prosenttisesti uusiutuvalla energialla ja ovat 98-prosenttisesti kierrätettävissä.

Invertterin nimellisteho on 4 kW, ja siihen kytkettyjen aurinkopaneelien maksimiteho on 6 kWp. Invertterillä on 10 vuoden tehdastakuu ja IP65-luokitus, joka mahdollistaa sen asentamisen ulkokäyttöön. Lisäksi invertterissä on älykäs etäseuranta järjestelmän tuoton ja toiminnan seuraamiseksi valmistajan sovelluksella.

Kokonaisuudessaan paketti sisältää verkkoinvertterin, paneelit, kattokiinnikkeet, turvakytkimet, AC- ja DC-kaapelit (30 m), muut tarvittavat liittimet ja tarvikkeet sekä asennuksen. Kaapeloinnit voidaan tehdä pinta-asennuksina tai jo olemassa olevia johtoreittejä käyttäen. Yritys huolehtii myös voimalan verkkoon liitettävyyden tarkistamisesta ja tekee ilmoituksen verkkoyhtiölle.

4.3.2 Tarjous B

Yritys B tarjoaa kohteeseen aurinkosähköjärjestelmän, joka tuottaa 6,73 kWp:n tehon ja asennetaan hintaan 8200 euroa. Paketti sisältää 16 kappaletta 420 Wp:n N-tyyppin kokomustaa paneelia. Yritys tarjoaa paneeleille 25 vuoden

tuotetakuun. Paneelit ovat kiinalaisvalmisteisia, mutta tämän tarkempia tietoja niistä ei ole saatavilla.

Pakettiin kuuluva invertterin nimellisteho on 6 kW, ja siihen asennettujen aurinkopaneelien maksimiteho on 9 kWp. Invertterillä on 10 vuoden tehdastakuu ja IP65-luokitus, joka mahdollistaa sen asentamisen rakennuksen ulkopuolelle. Lisäksi invertterissä on älykäs etäseuranta järjestelmän tuoton ja toiminnan seuraamiseksi valmistajan sovelluksella.

Kokonaisuudessaan paketti sisältää verkkoinvertterin, paneelit, paneelien katto kiinnikkeet, turvakytkimet, AC- ja DC-kaapelit (30 m), kaikki muut tarvittavat liittimet ja tarvikkeet sekä asennuksen. Kaapeloinnit voidaan tehdä pinta-asennuksina tai jo olemassa olevia johtoreittejä käyttäen. Yritys huolehtii myös voimalan verkkoon liitettävyyden tarkistamisesta ja tekee ilmoituksen verkkoyhtiölle. Asennustyön takuu on 2 vuotta.

4.3.3 Asennusvalmis paketti jälleenmyyjältä

Internetistä etsimällä löytyy paljon eri valmistajien asennusvalmiita paketteja. Näitä tutkiessa on kuitenkin hyvä olla tarkkana laitevalmistajia valittaessa. Pakettia valittaessa on kannattavaa valita järjestelmä, jossa valmistaja on vakava-rainen toimija, jonka toiminta markkinoilla todennäköisesti jatkuu, ja jonka valmistajalta löytyy toimiva asiakaspalvelu ja tuotetuki. Nämä asiat varmistamalla saa tukea ja apua mahdollisten ongelmatilanteiden ratkaisemisessa.

Tähän kohteeseen valitaan vertailuvaihtoehdoksi 4,1 kWp:n järjestelmä, joka on lähellä PVGIS-työkalulla mitoitettua järjestelmää. Paketin hinta on 3115 € (sis. alv 24 %). Kyseinen järjestelmä on tätä työtä tehdessä alennuksessa –46 %.

Paketti sisältää 10 kpl 410 W:n mustaa HalfCut PERC -yksikideaurinkopaneelia. Paneelit on valmistettu Kiinassa. Valmistaja antaa paneeleille 15 vuoden tuotetakuun ja 25 vuoden tehontuottotakuun.

Pakettiin kuuluvan invertterin nimellisteho on 6 kW, ja asennettujen aurinkopaneelien maksimiteho on 9 kWp. Laitteella on 10 vuoden tehdastakuu. Laitteella on IP66-luokitus, mikä mahdollistaa sen asentamisen rakennuksen ulkopuolelle. Invertterissä on integroitu ylijännitesuoja sekä tasavirtakytkin. Myös tässä invertterissä on mahdollisuus laitteen etäseurantaan valmistajan omalla sovelluksella.

Kokonaisuudessaan paketti sisältää verkkoinvertterin ja palamattoman taustalevyn, paneelit, paneelien alumiinikiskot, jatkopalat ja kiinnikkeet kattotyypin mukaan, 2 x 6 mm²:n aurinkopaneelikaapelin MC4-liittimillä (40 m), KEVI 1 x 6 mm² maadoituskaapelin, AC turvakytkimen ja varoitustarrat.

5 Pientuotannon liittäminen jakeluverkkoon

Tässä kohteessa aurinkosähköjärjestelmä liitetään Elenian sähköverkkoon. Elenia luokittelee sähkön pientuotannoksi alle 50 kVA:n tuotantolaitokset. Täytyy myös muistaa, että sähkönmyyjän kanssa pitää tehdä sopimus, jos halutaan syöttää ylijäävä sähkö takaisin sähköverkkoon. Nykyään lähes kaikki sähkönmyyjät tekevät tällaisia sopimuksia. Energiaviraston Sähkönhinta-sivustolta [25] pystyy tarkistamaan ja vertailla sähkösopimuksia ja sitä, mitkä sähkönmyyjät tarjoavat takaisinmyyntisopimusta alueella. Sähkön pientuotannosta maksetaan Nord Pool-sähköpörssin Suomen markkinan tuntikohtaisen hinnan (spot-hinta) mukaan. Pientuotannossa sähkön myyntisopimuksessa ei yleensä ole perusmaksua, mutta siitä peritään välityspalkkio. Esimerkkinä Helenin sopimus on seuraavanlainen: perusmaksu 0 €/kk ja välityspalkkio 0,3 c/kWh. Kaikki hinnat ovat alv 0 %. Mikäli asiakas on alv-velvollinen, hintoihin lisätään kulloinkin voimassa oleva arvonlisävero. Hehkuenergia tarjoaa samanlaisen sopimuksen, mutta välityspalkkio on 0,31 c/kWh. Vertailemalla eri sähkönmyyjien sopimuksia saadaan selville, että hinnat ovat melko samanlaisia. [26.]

Nimellisteholtaan alle 100 kVA:n aurinkosähköjärjestelmä ei tarvitse omaa mittalaitetta. On sähköverkkoyhtiön vastuulla toimittaa kiinteistöön mittari, jolla pystytään mittaamaan erikseen verkosta otettu ja verkkoon syötetty energia.

Onkin hyvä käytäntö varmistaa verkonhaltijalta ennen järjestelmän asentamista, että sen liittäminen jakeluverkkoon onnistuu. Elenia, jonka jakeluverkkoalueelle tämä kiinteistö kuuluu, tarjoaa verkkosivuillaan aurinkosähkölaskuria, jolla pystyy varmistamaan, onko suunniteltu laitteisto heti kytkettävissä. Yleisesti ottaen alle 11 kW:n laitteistot voidaan liittää verkkoon ilman erityisiä toimenpiteitä. [26.] Kuvassa 25 on havainnollistettu erikokoisten pientuotantolaitosten vaatimuksia.

Huomioitava vaatimus	Käsikirjan luku	< 50 kVA (~kWp)	< 100 kVA (~ kWp)	≥ 100 kVA (~kWp)
Mittausasetus: ei erillismittarointia tuotantolaitokselle	3.2.1	×	×	
Mittausasetus: erillismittarointi tuotantolaitokselle	3.2.2			×
Sähkönmyyntisopimus	3.2.4	×	×	×
Sähköverolaki: Vapautus sähköverosta	3.2.5	×	×	
Sähköverolaki: Sähköveroilmoitus ja -maksu	3.2.5			yli 800 MWh/a
Verohallinto: Kotitalouden tuloverotus	3.2.6	×		
Sähkönsiirto kiinteistörajojen yli	3.2.7	×	×	×

Kuva 25. Erikoisten pientuotantolaitosten mittauksen ja verotuksen vaatimukset [15, s. 33].

Sähköntuotanto on Suomessa kaikille vapaata toimintaa, kunhan se täyttää tietyt reunaehdot. Sähkön laadun hallinta on tärkeää myös pientuotannossa ja, järjestelmä ei saa aiheuttaa häiriötä jakeluverkkoon. Näitä voivat olla esimerkiksi jännitteen tai taajuuden muutokset. Siksi täytyykin käyttää hyväksytyjä verkkoinverttereitä, jotka huolehtivat tästä. Aurinkosähkölaitteisto ei saa aiheuttaa häiriötä verkkoon tai kiinteistön muihin sähköasennuksiin. Jos järjestelmään syntyy vika, täytyy invertteri irrottaa se verkosta ja rajata vika aurinkovoimalaan. Sähkömarkkinalain ja Energiaviraston laintulkinnan mukaan verkonhaltija ei voi lähtökohtaisesti kieltäytyä tai rajoittaa pientuotannon liittämistä kuin tilapäisesti sellaisessa tilanteessa, että verkkoa on vahvistettava, ja tällöinkin enintään vahvistamisen edellyttämäksi kohtuulliseksi ajaksi. [26.]

6 Tuet ja vähennykset

Aurinkosähköjärjestelmän hankintaan ja asennukseen niin kuin muihinkin kotona tehtyihin korjaus- ja remonttitoihin saa kotitalousvähennyksen. Kotitalousvähennyksen maksimisumma on 2250 € henkilöä kohti. Omavastuu on 100 euroa vuodessa henkilöltä. Kotitalousvähennykseen oikeuttava osuus on 40 % asennustöiden kustannuksista, jos työt teetetään yrityksellä. Kotitalousvähennys on henkilökohtainen ja, jos taloudessa asuu kaksi henkilöä voi vähennystä saada siis yhteensä 4500 €. [27.] Tässä työssä esimerkiksi yrityksen A tarjouksessa kotitalousvähennykseen oikeuttava työ osuus on 3528,8 €.

ARA myönsi energia-avustuksia vuosina 2020–2023, mutta enää avustuksia ei voi hakea. Työ- ja elinkeinoministeriö edistää energiatuella uuden energiateknologian käyttöönottoa, mutta tämä avustus ei koske asunto-osakeyhtiöitä tai kotitalouksia [28].

7 Yhteenveto

Työn tarkoituksena oli perehtyä aurinkosähköjärjestelmän mitoitukseen ja hankintaan omakotitalossa ja mitä erilaisia asioita täytyy ottaa huomioon tätä tehdessä. Mitoitusta varten työssä perehdyttiin aurinkosähköjärjestelmän komponentteihin, mikä komponentin tehtävä järjestelmässä on ja minkälaisia eri vaihtoehtoja järjestelmää valittaessa on.

Aurinkosähköjärjestelmän mitoituksessa käytettiin Euroopan komission ylläpitämää verkkopohjaista PVGIS-työkalua. Tätä työkalua oli helppo käyttää ja sillä sai selkeät laskentatulokset, joiden pohjalta pystyttiin mitoittamaan kohteeseen sopiva järjestelmä. Järjestelmän huolellinen mitoitus on tärkeää, jos siitä halutaan saada kustannustehokas. Työssä todettiin, että parhaan hyödyn järjestelmästä saa, kun tuotettu energia käytetään pääsääntöisesti itse, ja mitoitus toteutettiin niin, että tämä toteutuu.

Työssä pyydettiin tarjoukset talon kulutustietojen perusteella kahdelta eri yritykseltä, jotta saatiin selville minkä kokoisia järjestelmiä ne tarjoavat. Toinen tarjouksista (3,36 kWp) oli melko lähellä omaa mitoitusta, kun taas toinen oli hie- man ylimitoitettu (6,73 kWp). Järjestelmän mitoitus ja laaja kilpailutus onkin tärkeää, koska laitteiden jälleenmyyjillä on varmasti halu myydä kohteeseen mahdollisimman iso järjestelmä. Järjestelmää valittaessa on myös tärkeää varmistua komponenttien hyvästä laadusta ja siitä, että niille saa takuut. Näin voidaan varmistaa laitteiston pitkä käyttöikä ja välttyä yllättäviltä lisäkustannuksilta.

Opinnäytetyö onnistui mielestäni tyydyttävästi. Työtä tehdessä opin paljon aurinkosähköjärjestelmään liittyvistä komponenteista sekä pääsin syventymään tarkemmin, mikä eri komponenttien tehtävä järjestelmässä oli. Itseni kannalta merkittävin asia minkä opin, oli aurinkosähköjärjestelmän mitoittaminen ja oikean kokoisen järjestelmän valinta.

Lähteet

- 1 How Does Solar Work? Verkkoaineisto. Solar Energy Technologies Office. <<https://www.energy.gov/eere/solar/how-does-solar-work>>. Luettu 20.4.2024.
- 2 Perlin, John. 2013. Let It Shine: The 6000 Year Story of Solar Energy. Verkkoaineisto. John Perlin. <<https://john-perlin.com/let-it-shine.html>>. 2013. Luettu 20.4.2024.
- 3 Chu, Elizabeth & Tarazano, D. Lawrence. A Brief History of Solar Panels. Verkkoaineisto. Smithsonian Magazine. <<https://www.smithsonian-mag.com/sponsored/brief-history-solar-panels-180972006/>>. Luettu 20.4.2024.
- 4 Chobos, Alan. 2009. April 25, 1954: Bell Labs Demonstrates the First Practical Silicon Solar Cell. Verkkoaineisto. APS News. <<https://www.aps.org/apsnews/2009/04/bell-labs-silicon-solar-cell>>. 1.4.2009. Luettu 20.4.2024.
- 5 Solar PV power generation in the Net Zero Scenario, 2000-2030. 2021. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/solar-pv-power-generation-in-the-net-zero-scenario-2000-2030>>. Päivitetty 4.11.2021. Luettu 20.4.2024.
- 6 Solar PV. Verkkoaineisto. International Energy Agency. <<https://www.iea.org/energy-system/renewables/solar-pv>>. Luettu 20.4.2024.
- 7 Auringonsäteilyn määrä Suomessa. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa>. Päivitetty 31.1.2024. Luettu 9.4.2024.
- 8 Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi Suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021. 2022. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <<https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>>. 20.6.2022. Luettu 20.4.2023.
- 9 Kääriäinen, Juuso. 2023. Suomen suurin aurinkovoimala ei kohta enää olekaan Nurmossa – selittäjäkin on silti vielä pieni sen rinnalla, mitä suunnitellaan. Verkkoaineisto. YLE. <<https://yle.fi/a/74-20023845>>. 29.3.2023. Luettu 9.4.2024.

- 10 Aurinkosähkön kapasiteetti kasvoi Suomessa yli 100 megawattia vuonna 2021. 2022. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <<https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-kapasiteetti-kasvoi-suomessa-yli-100-megawattia-vuonna-2021>>. 20.6.2022. Luettu 20.4.2023.
- 11 Nurmi, Simo. 2024. Sähkömarkkinat nyt – katsaus vuoteen 2023. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <<https://energiavirasto.fi/documents/11120570/199565096/Energiavirasto+mediainfo+23012024.pdf/5697715f-e854-813c-f241-80de809d9c34/Energiavirasto+mediainfo+23012024.pdf?t=1705992096426>>. 23.1.2024. Luettu 9.4.2024.
- 12 Ylijäämäsähkön myynti. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti>. Päivitetty 25.1.2024. Luettu 20.4.2024.
- 13 Verkkoon liitetty aurinkosähköjärjestelmä. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/tarvittava_laitteisto/verkkoon_liitetty_aurinkosahkojarjestelma>. Päivitetty 31.1.2024. Luettu 10.4.2024.
- 14 Tahkokorpi, Markku. 2016. Aurinkoenergia Suomessa. Helsinki: Into Kustannus.
- 15 Orrberg, Matti. 2021 Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus ST-käsikirja 40. 2., uudistettu painos. Espoo: Sähkötieto ry.
- 16 Building-Integrated Photovoltaics. Verkkoaineisto. Solar Energy Industries Association. <<https://www.seia.org/initiatives/building-integrated-photovoltaics>>. Luettu 1.4.2024.
- 17 Jäger, Klaus; Isabella, Olindo; Smets, Arno H.M.; van Swaaij, René A.C.M.M. & Zeman, Miro. 2014. Solar Energy: Fundamentals, Technology, and Systems. Verkkoaineisto. Delft University of Technology. <https://courses.edx.org/c4x/DelftX/ET.3034TU/asset/solar_energy_v1.1.pdf>. 2014. Luettu 1.4.2024.
- 18 Richardson, Janet. 2023. Monocrystalline Solar Panels. Verkkoaineisto. The Renewable Energy Hub UK. <<https://www.renewableenergyhub.co.uk/main/solar-panels/monocrystalline-solar-panels>>. Päivitetty 3.10.2023. Luettu 24.4.2023.
- 19 Lavaa, Anaa. 2023. The Complete Guide to Polycrystalline Solar Panel: Features, Working Principle, and Applications. Verkkoaineisto. Linqip Technews. <<https://www.linqip.com/blog/polycrystalline-solar-panel/>>. Päivitetty 6.6.2023. Luettu 20.4.2024.

- 20 Thin-Film Solar Panels: An In-Depth Guide: Types, Pros & Cons. 2022. Verkkoaineisto. Solar Magazine. <<https://solarmagazine.com/solar-panels/thin-film-solar-panels/>>. 12.3.2022. Luettu 25.4.2023.
- 21 What is solar inverter? Verkkoaineisto. Hebe Solar. <<https://www.hebe-solar.com/solar-inverter>>. Luettu 30.4.2024.
- 22 Miten mikroinvertteri toimii? 2019. Verkkoaineisto. Ralos Oy. <https://www.facebook.com/Ralos.eco/photos/a.334391510379020/599025097248992/?paipv=0&eav=Afab-Hlm2hJ_uVZjKB5DRE_0m7tGfaWLx_iil6sXlxuo-tuoXsA32hX82g3F3WACbt_XM&_rdr>. 3.5.2019. Luettu 7.12.2023.
- 23 Sähkön varastointi. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/sahkon_varastointi>. Päivitetty 2.8.2022. Luettu 28.4.2024.
- 24 Photovoltaic Geographical information System. 2022. Verkkoaineisto. Euroopan komissio. <https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html>. Päivitetty 01.03.2022. Luettu 38.4.2024.
- 25 Sähkönhinta.fi. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <<https://www.sahkonhinta.fi/>>. Luettu 30.4.2024.
- 26 Aurinkosähkö ja sähkön pientuotanto. Verkkoaineisto. Elenia Oy. <<https://www.elenia.fi/palvelut/kotiin-ja-mokille/aurinkosahkon-ja-pientuotannon-liittaminen>>. Luettu 30.4.2024.
- 27 Aurinkosähkötuotannon taloudellinen tukeminen. 2024. Verkkoaineisto. Motiva. <https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/jarjestelman_valinta/aurinkosahkotuotannon_taloudellinen_tukeminen>. 31.1.2024. Luettu 30.4.2024.
- 28 Energia-avustukset. 2024. Verkkoaineisto. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus. <https://www.ara.fi/fi-FI/Lainat_ja_avustukset/Energiaavustus>. Päivitetty 23.2.2024. Luettu 30.4.2024.