



MAATILAN AURINKOENERGIAJÄRJESTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

Markus Lappalainen

Tarkastaja(t): Professori Esa Vakkilainen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Markus Lappalainen

Maatilan Aurinkoenergiajärjestelmä

Energiatekniikan kandidaatintyö

2023

27 sivua, 10 kuvaa, 4 taulukkoa

Tarkastaja(t): Professori Esa Vakkilainen

Avainsanat: Aurinkoenergia, maatalous, Energiavarasto,

Tässä kandidaatin työssä suunnitellaan pienen kokoluokan aurinkovoimalaitos, energiavarasto ja lasketaan niiden kustannukset. Työn tavoite on selvittää aurinkoenergiajärjestelmän kannattavuus Etelä-Savossa sijaitsevalle maatilalle. Maatilan ympäristön ja rakennusten kattojen sopivuus selvitetään. Lasketaan edeltävien vuosien sähkönhintojen perusteella kustannuslaskennat, joista saadaan voimalaitoksen kannattavuus.

Alkuun selvitetään valosähköilmiön toiminta ja miten sitä hyödynnetään sähköntuotannossa. Käydään lävitse aurinkovoiman vahvuudet ja heikkoudet Suomen olosuhteissa. Tehdään selvitys aurinkopaneelien tyypeistä ja millä tavalla aurinkopaneeleja voidaan asentaa. Käydään lävitse miten erinäiset energiavarastot toimivat ja mihin niiden toiminta perustuu.

Maatilan ympäröimä alue tutkittiin puiden aiheuttaman varjostuksen ja kattopintojen sopivuuden kannalta aurinkoenergian tuotantoon. Todettiin alue sopivaksi energian tuotantoon. Simuloitiin aurinkovoimalan energian tuotanto valitulla paneeli kokoonpanolla ja selvitettiin sen avulla omakäyttöaste.

Kustannuslaskennat toteutettiin simulaatio tuloksien ja voimalaitoksen komponenttien hintojen perusteella. Laskettiin takaisinmaksuaika tukemattomalle ja tuetulle energiajärjestelmälle.

Aurinkovoimalaitoksen sijoittaminen maatilalle todettiin kannattavaksi, kun energiavarastoa ei hankinta järjestelmä kokonaisuuteen. Nykyisen geopoliittisen tilanteen takia sähkön hinnan arviointi todettiin mahdottomaksi.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Markus Lappalainen

Solar energy system of dairy farm

Bachelor's thesis

2023

27 pages, 10 figures, 4 tables

Examiners: Professor Esa Vakkilainen

Solar energy, Energy storage,

In this bachelor's thesis a small-scale solar power plant is designed which includes energy storage and calculations for cost of the system. The purpose of this thesis is to solve the profitability of solar energy system at dairy farm located at South-Savo. Suitability of surrounding environment and rooftops is evaluated. Using electricity costs from previous years the investment costs are calculated where profitability is determined.

In the beginning the theory of photovoltaic effect is untwined and how it is used in electricity productions. Strengths and weaknesses of solar energy in Finland are clarified. An account is made of what type of solar panels are used and how panels can be installed. Methods of storing energy is elaborated and how they function.

The environment around the dairy farm is examined for effects of tree shading and suitability of rooftops for solar energy production. The environment is found to be suitable for energy production. Energy production of powerplant was simulated using chosen solar panels and the self-use rate was figured with it.

Investment costs were calculated using data from the simulation and the costs of the components of the powerplant. Repayment time was calculated for state supported system and unsupported system.

Solar powerplant of dairy farm was found to be profitable if energy storage is not implemented into the system. Due to current geopolitical situation predicting electricity prices was found out to be impossible.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

<i>A</i>	pinta-ala	[m ²]
<i>P</i>	Voimalaitoksen teho	[W]
<i>N</i>	lukumäärä	[-]
<i>S</i>	Vuosittainen säästö	[€]
<i>E</i>	Voimalan sähköntuotanto	[kWh]
<i>ks</i>	omakäyttöaste	[-]
<i>k</i>	Sähkön hinta	[snt/kWh]
<i>K</i>	Voimalaitoksen investointihinta	[€]
<i>t</i>	Aika	[a]

Kreikkalaiset

μ	tehohäviö	[-]
-------	-----------	-----

Alaindeksit

0,1	Ensimmäinen
n	Luku
g	aggregaatti

Lyhenteet

MES	Mekaaninen energiavarasto (Mechanical energy storage)
CES	Kemiallinen energiavarasto (Chemical energy storage)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	6
1.1	Pohjatiedot.....	6
1.2	Tutkimuksen tarkoitus ja kysymys.....	6
2	Aurinkovoima.....	7
2.1.1	Aurinkovoiman hyödyt ja haasteet Suomessa	7
2.1.2	Aurinkojärjestelmät	8
2.1.3	Aurinkojärjestelmän asennustavat	8
3	Energian varastointi.....	9
3.1	Sähköenergian varastointi	10
3.1.1	Mekaanisen energian varastot.....	10
3.1.2	Kemiallisen energian varastot.....	11
3.1.3	Sähkökemialliset varastot	11
4	Aurinkoenergiajärjestelmän suunnittelu.....	12
4.1	Aurinkovoimalaitoksen mitoitus.....	12
4.1.1	Sijainti ja maasto.....	13
4.1.2	Paneelien asennustapa ja tyyppi	14
4.1.3	Energiavaraston mitoitus	16
4.1.4	Johdotukset ja invertterin valinta.....	20
4.2	Voimalaitoksen simulointi	20
5	Kustannuslaskenta	23
5.1	Aurinkovoimalaitoksen kustannuslaskenta.....	23
5.2	Investointilaskennan arviointi	25
6	Johtopäätökset	25
	Lähteet	27

1 Johdanto

Tässä tutkimuksessa käydään lävitse aurinkoenergian ja energiavarastoinnin teoriaa ja käydään lävitse mitä aurinkoenergia järjestelmän suunnittelu vaihe vaiheelta. Lopuksi työssä käydään lävitse energiajärjestelmän kustannukset ja takaisinmaksuajat.

1.1 Pohjatiedot

Aurinkoenergia järjestelmä mitoitetaan Kangasniemellä sijaitsevalle lypsykarjatilalle, jonka huippukuormat ajoittuvat aamuun ja iltapäivään, joiden mitoitavana tehona käytetään traktori käyttöisen aggregaatin nimellistehoa, joka on 23 kVA ja pääsulakkeiden 3x 35 A rajatehoa, joka on 24 kW. Näiden tietojen lisäksi tilalta on tilastoituna sähkön kulutus vuosilta 2016–2021.

1.2 Tutkimuksen tarkoitus ja kysymys

Tutkimuksen tarkoituksena on pohtia millainen aurinkovoimalaitos ja energiavarasto olisi järkevää rakentaa maatilalle, jonka vuosittainen energian kulutus on noin 67 megawattituntia ja pohtia mitä haasteita systeemin mitoittamiseen liittyy. Tutkimuksessa ei suoriteta tarkempia sähköteknisiä mitoituksia kuten johto ja kytkentä mitoituksia, vaan millä tavalla johdot tulisi yleisesti asentaa. Muutoin tutkimuksesta tulisi liian laaja kandidaatin työn rajoissa.

2 Aurinkovoima

Auringon säteily sisältää suurimman osan maahan saapuvasta energiasta. Auringon säteily johtuu auringon sisällä tapahtuvasta fuusio reaktiosta, josta johtuva säteily emittoituu auringon pinnalta kaikkiin suuntiin. Tällöin maan ilmakehään osuvan säteilyn intensiteetti on noin 1370 W/m^2 , minkä suuruus vaihtelee vuoden mittaan, kun auringon etäisyys maasta vaihtelee. Tämän lisäksi maan pinnalle pääsevän säteilyn intensiteetti vähenee, kun se matkaa ilmakehässä ja osa fotoneista absorboituu ilman molekyyliin tai heijastuu niistä. Maahan pääsevää osuutta kutsutaan ”säteilyvoimakkuudeksi”, jonka voimakkuus vaihtelee maan pinnan korkeuden ja päivän mittaan. Suurimmillaan maahan osuva säteily on silloin, kun auringon valo on kohtisuorassa maata kohti. (Roy et al., 2018: 21–56) Suomessa keskimääräisen maahan osuvan säteilysumman suuruus vuodessa on noin 900 kWh/m^2 (Kosonen & Breyer, 2019).

Aurinkopaneelien toiminta perustuu valosähköilmiöön, eli ilmiöön, missä säteilyn seurauksena puolijohdemateriaalissa olevat elektronit absorboivat photoneita, jolloin ne irtautuvat materiaalista. Irtautuneet elektronit kulkeutuvat valenssivyöltä puolijohteen johtavuusvyölle, jolloin valenssivyölle muodostuu elektroniaukkoja. (Ouyang et al., 2019: 1807672-n/a) Tämä aiheuttaa jännitteen puolijohteen valenssi- ja johtavuusvyön välille, minkä avulla voidaan muuntaa auringon valoa tasasähköksi. Jotta paneelien tuottama tasasähkö voidaan syöttää vaihtovirtaverkkoon, on se muunnettava vaihtovirraksi invertterillä.

2.1.1 Aurinkovoiman hyödyt ja haasteet Suomessa

Suurimpana etuna aurinkovoimalle on se, että se on uusiutuvaa energiaa, jota on saatavilla auringon paistaessa rajattomasti, ihmisten päivässä kuluttama energia vastaa auringon maahan säteilemää energiaa 14.5 sekunnilta (Kosonen & Breyer, 2019). Tämän lisäksi aurinkovoima ei tuota kasvihuonepäästöjä ja aurinkovoimalaitos on huoltovapaa invertterien vaihtoa lukuun ottamatta. Tällöin invertterit vaihdetaan 10–15 vuoden käytön jälkeen. Aurinkopaneelien oma käyttöikä on noin 25 vuotta, jonka jälkeenkin paneelien tuottama huipputeho on 80–90 % uusien paneelien tehoista. Tämän lisäksi paneelien valmistajat tarjoavat tehokuita 15–25 ensimmäiselle vuodelle.

Suomessa aurinkoenergiaa pystytään hyödyntämään kesän aikana hyvin, mutta haasteeksi muodostuu säteilyn vähäisyys talvikuukausina, jolloin energiavarastoinnin merkitys päivä ja vuodenaikatasolla korostuu. Tästä huolimatta Suomessa suuremmaksi haasteeksi aurinkovoiman kohdalla osoittautuu yleinen asenne aurinkovoimaa kohtaan, ettei aurinko paistaisi Suomessa ja ettei asian muuttamiseen ei löydy poliittista tahtoa. (Child et al., 2017: 1358)

2.1.2 Aurinkojärjestelmät

Aurinkojärjestelmiä on kahden laisia, yksi- ja kaksipuoleisia. Yksipuoleiset aurinkopaneelit keräävät auringon valoa vain yhdeltä sivulta, mutta ovat edelleenkin yleisin aurinkopaneelityyppi, jonka takia edelleen edullisempia kuin kaksipuoleiset aurinkopaneelit. markkinoilta löytyy kuitenkin yksittäisiä tarjouksia, joissa myydään kaksipuoleisia aurinkopaneeleita samaan hintaan kuin yksipuoleisia aurinkopaneeleita. Yksipuoleisten paneelien tehokkuutta voidaan parantaa asentamalla ne optimaalisesti auringon valoa kohden.

Kaksipuoleiset aurinkopaneelit pystyvät keräämään auringon valoa sekä etusivulta, että takasivulta, jolloin ne pystyvät hyödyntämään enemmän niihin osuvasta säteilystä. Kaksipuoleiset paneelit pyritään asentamaan irralleen maasta tai kattorakenteista, jotta paneelin toiselle puolelle osuisi mahdollisimman paljon heijastunutta valoa. Nämä paneelit tuottavat 15 % enemmän sähköä itä-länsi suunnassa kuin etelä-pohjoinen suunnassa 30° leveysasteeseen saakka ja käänteisesti leveysasteilla, jotka ovat yli 30°. (Sun et al., 2018: 1601–1610)

Tällöin Suomen olosuhteissa kaksipuoleisten aurinkopaneelien asentaminen olisi järkevää etelä-pohjoinen suunnassa, jotta niiden sähkön tuotto olisi tehokkainta. Kaksipuoleisten paneelien asennuksessa kuitenkin pitää ottaa huomioon, että niiden alla olevan pinnan heijastuskyvyn pitää olla tarpeeksi suuri, jotta kaksipuoleisten paneelien asennuksessa on hyötyä. Tämän lisäksi kaksipuoleisten paneelien täytyy olla tarpeeksi korkealla maasta, jotta heijastuneen säteilyn määrä on hyödynnettävissä.

2.1.3 Aurinkojärjestelmän asennustavat

Aurinkoenergiajärjestelmät voidaan jakaa kahteen tyyppiin, aurinkoa seuraaviin järjestelmiin ja kiinteisiin järjestelmiin. Aurinkoa seuraavat järjestelmät suuntaavat aurinkopaneelit auringon suuntaisesti pyrkien maksimoimaan niihin osuvan auringon säteilyn. Nämä

järjestelmät jakautuvat kahteen tyyppiin, kaksi- ja yksiakseliseen järjestelmään. Kaksiakselinen järjestelmä pystyy seuraamaan auringon valoa parhaiten, mutta ei ole aina kaikkein tehokkain järjestelmä, koska tarvitsee tilaa liikkuaan. Yksiakselinen järjestelmä pystyy nimensä mukaisesti kääntymään yhteen suuntaan ja kääntyy auringon valon mukaisesti, jotta paneeli pysyisi mahdollisimman kohtisuorassa auringon valoa vasten.

Kiinteät aurinkojärjestelmät asennetaan paikoilleen halutussa kulmassa, ja niitä voidaan asentaa rakennusten katoille seiniin tai katoksiksi. Se mihinkä kulmaan ja suuntaan paneelit kannattaa asentaa riippuu auringon säteilyn kulmasta. Päiväntasaajalla aurinkopaneelien asentaminen suureen kulmaan ei ole järkevää, koska auringon valo osuu maahan lähes kohtisuoraan, mutta siirtyessä pois päiväntasaajalta auringon valon kulma maahan nähden kasvaa jolloin, paneelien tehokkuuden parantamiseksi kannattaa ne asentaa jyrkempään kulmaan. Tämän takia Suomessa on järkevää asentaa aurinkopaneeleja rakennusten julkisivuihin, koska talvisin aurinko paistaa matalalta ja niihin osuvan säteilyn osuus on suuri (Kosonen & Breyer, 2019).

3 Energian varastointi

Energian varastointi on elintärkeä linkki energian jakeluketjua, koska mikään systeemi ei toimi 100 % hyötysuhteella. Energiahäviöt useimmissa järjestelmissä häviävät ympäristöön hukkalämpönä. Näistä hukkalämmöistä voidaan tehdä energia resursseja, mikäli ne otetaan talteen ja hyöty käytetään toisiin prosesseihin. Hukkalämmön lisäksi energiavarastointi on tärkeässä roolissa, kun siirrytään vähäpäästöiseen talouteen, missä energian tuotanto on suunniteltu uusiutuvien energialähteiden varaan. Näiden energialähteiden haasteina on niiden epäsäännöllinen tuotanto, missä ne tuottavat energiaa ajoittain, minkä takia ne soveltuvat huonosti vakaan energian tuotantoon. Tämän haasteen pystyy ratkaisemaan energian varastoinnilla, missä ylimääräinen tuotanto varastoidaan ja käytetään, kun uusiutuvat energiamuodot eivät kykene sitä tuottamaan. Nämä varastointitavat jakautuvat kahteen tyyppiin, sähköenergia -ja lämpöenergia varastointiin. (Aneke & Wang, 2016: 350–377)

3.1 Sähköenergian varastointi

Sähköenergiaa ei voi varastoida sellaisenaan verkkoon, jonka takia se pitää varastoida toiseen muotoon. Näistä yleisimmät ovat mekaaninen energia (MES), kemiallinen energia (CES), ja sähkökemiallinen energia varastointi.

3.1.1 Mekaanisen energian varastot

Mekaaniset energia varastot perustuvat liike-energian tai potentiaalienergian kasvatukseen. Liike-energiaan perustuvia varastoja ovat vauhtipyörällä toimivat energiavarastot, joiden toiminta perustuu liike-energian säilymislakiin. Tämän lisäksi vauhtipyörillä on matalat käyttökustannukset, pitkä käyttöikä ja ne ovat vapaita purkusyvyyden vaikutuksista. Eduistaan huolimatta vauhtipyörät soveltuvat kitkahäviöiden takia vain lyhyeen energian varastointiin. Suoraan latauksesta hyötysuhde prosessille on 85 %, mutta jo viiden tunnin varastoinnin aikana se putoaa 78 %:iin ja päivän jälkeen 45 %:iin

Toinen mekaanisen energian varastointi tapa on pumpattu vesi energiavarasto. Se on laajasti käytetty suuren luokan energian varasto, jonka toiminta perustuu veden pumppaamisella saatuun potentiaalienergian kasvuun, kun vettä pumpataan ylämäkeen halvan sähkön hinnan aikana. Kun energiaa tarvitaan takaisin verkkoon, pumpattu vesi ajetaan alamäessä olevaan turbiiniin, jolloin saadaan tuotettua sähköä. Etuina kyseiselle energian varastoinnille on sen kokoluokka, jolloin siihen voidaan varastoida ja siitä voidaan syöttää takaisin verkkoon sähköenergiaa megawattien teholuokassa. Rajoittavana tekijänä kyseiselle energian varastoinnille on se, että se tarvitsee suuren korkeuseron varastoaltaan ja turbiinin välille, sekä se että se vaatii huomattavan määrän vettä toimiakseen. Hyötysuhde prosessille on 65–85 %

Kolmas mekaanisen energian varastointi tapa on paineilmaenergiavarasto. Tässä energianvarastointi tavassa ilmaa puristetaan kompressoreilla, jonka jälkeen paineistettu ilma varastoidaan maaperässä oleviin onkaloihin tai maan pinnalla oleviin painesäiliöihin. Kun energiaa tarvitaan, syötetään paineistettu ilma turbiiniin sähkön tuottamiseksi. Hyötysuhde paineilmaenergia varastoinnille on 70 % luokkaa. (Aneke & Wang, 2016: 350–377)

3.1.2 Kemiallisen energian varastot

Muunnettaessa energiaa sähköstä kemiallisiksi yhdisteiksi saadaan energiatiheämpiä varastointimenetelmiä, kuin mekaanisilla energiavarastoilla, jonka takia ovat ideaalisia energian varastointimenetelmiä. Nämä yhdisteet sisältävät vedyn, metaanin ja erinäiset hiilivedyt. Muunnettaessa sähköä vedyksi elektrolyysin avulla saadaan noin 60 % energiasta muunnettua vedyksi. Mikäli vedystä halutaan tehdä metaania ja muita hiilivetyjä tarvitaan niiden syntetisointiin energiaa, minkä vuoksi on tehokkaampaa käyttää vetyä sellaisenaan. Kemiallisen energian varastoinnissa siihen käytetty energia pitäisi olla uusituvista energian lähteistä, koska on energiatehokkaampaa olla tuottamatta hukkaenergiaa verkkoon kuin varastoida fossiilisesti tuotettua energiaa. Vedyn kemiallisen energian muuntamisessa sähköksi menetetään noin puolet vetyyn käytetystä energiasta, jolloin kokonaishyötysuhde on 30 % luokkaa. (Aneke & Wang, 2016: 350–377)

3.1.3 Sähkökemialliset varastot

Sähkökemiallisilla energiavarastoilla tarkoitetaan kondensaattoreilla ja akuilla toteutettuja energiavarastoja. Kondensaattori pohjaiset energiavarastot ovat nopeita pienen kokoluokan energiavarastoja, jotka pystyvät purkamaan ja lataamaan itsensä erittäin nopeasti ja tehokkaasti. Kondensaattorien hyötysuhde on 95 %, mutta ne menettävät päivittäin 5 % latauksesta, jonka takia niiden energia on hyödynnettävä mahdollisimman nopeasti.

Akuilla toteutettavia energiavarastoja on monia, sillä erinäisiä akkutyyppejä on paljon. Yleisellä tasolla akkujen energian takaisinsyöttöhyötysuhde on 60–80 %, mutta syväpurkuakuilla hyötysuhde on 70–80 % luokkaa. Tämän projektin kannalta tärkeimmät akkutyypit ovat lyijy- ja litium ioni akut.

Lyijyakut ovat vanhimpia yleisessä käytössä olevia akkuja, mutta sen taloudellinen käytettävyys on rajoittunut tehokkaampien akkutyyppeiden yleistymisen takia. Lyijyakkujen energia- ja purkuteiheys on 30 W h/kg ja 150 W/kg. Lyijyakkujen energiatehokkuus on 85–90 % luokkaa. Etuina lyijyakuille on niiden halpa hinta ja pieni käyttökustannus. (Aneke & Wang, 2016: 350–377)

Litiumioniakut ovat kevyitä ja tehokkaampia kuin muut akkutyypit, jonka takia yleisiä kulluttajien elektroniikassa. Litium pohjaisien akkujen energia- ja tehotiheys on 90–190 W h/kg ja 500–2000 W/kg. Tämän lisäksi litiumakuilla on korkea tehokkuus ja matala itsepurkautumisnopeus. Haasteena litiumakkujen käytössä on niiden hauraus ja niiden lämpötilariippuvainen käyttöikä. Tämän lisäksi litiumakut ovat lyijyakkua kalliimpia. (Aneke & Wang, 2016: 350–377)

4 Aurinkoenergiajärjestelmän suunnittelu

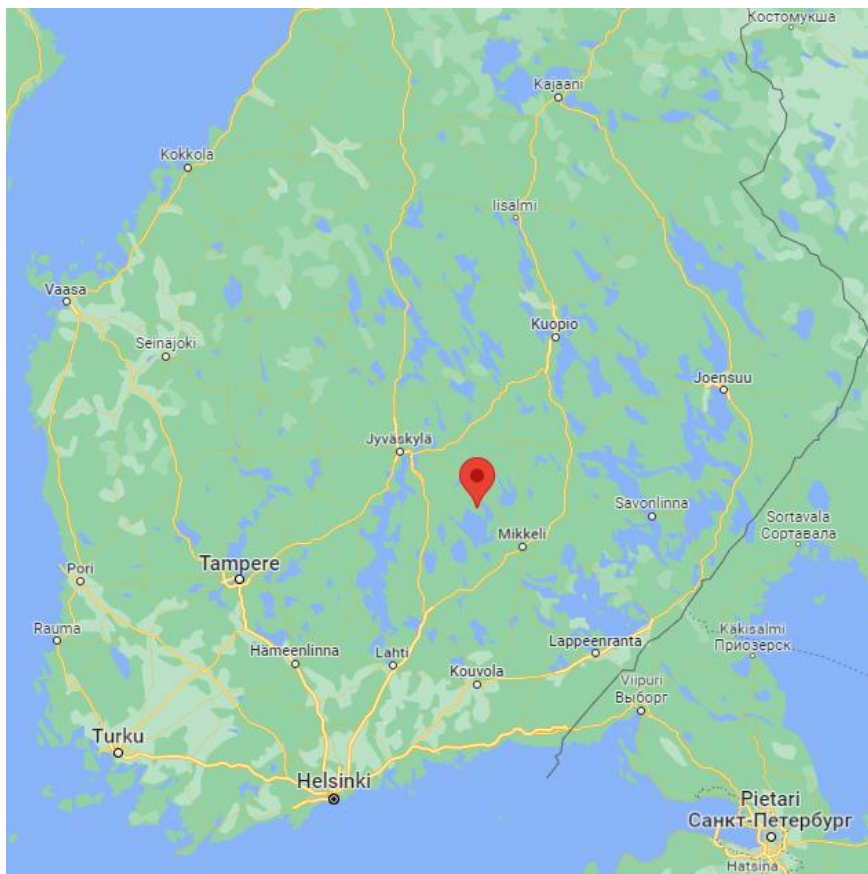
Jotta aurinkovoimalaitos voidaan suunnitella pitää rakennuspaikasta tietää sen sijainti ja maasto. Kun sijainti ja maasto on määritetty, voidaan määrittää minkä tyyppisillä paneeleilla ja asennustavalla voimalaitos voitaisiin toteuttaa. Paneelien ja asennustavan määrittämisen jälkeen lasketaan voimalaitokselle maatilán vuosikulutuksen ja huipputehon pohjalta mitoitus-teho aurinkovoimalaitokselle ja määritellään energiavaraston koko, jotta tilán kriittiset toiminnot eli karjan lypsäminen, kylmäketjun ylläpito ja karjan juomaveden saatavuus pystyttäisiin toteuttamaan, tilanteessa, missä maatilán yhteys valtakunnalliseen verkkoon katkeaisi. Kun nämä kohdat on määritetty, määritellään johdotukset aurinkoenergiajärjestelmälle. Johdotusten määrittämisen jälkeen simuloidaan voimalaitoksen tuotantomäärät ja lopuksi lasketaan aurinkoenergiajärjestelmán investointikustannukset ja takaisinmaksuaika.

4.1 Aurinkovoimalaitoksen mitoitus

Tässä kappaleessa määritellään aurinkovoimalaitoksen tarkka sijainti ja määritellään sen sopevuus aurinkosähkön tuotantoa varten. Sen jälkeen määritetään käytettävä aurinkopaneeli ja niiden määrä, kun haluttu huipputeho on käytössä olevan aggregaatin nimellisteho. Kun paneelit ovat määritetty lasketaan energiajärjestelmán kokoluokka hyödyntäen tilán tunti-kohtaisen sähkönkulutuksen keskiarvoa kesäkuun alusta heinäkuun loppuun. Energiavaraston mitoituksen jälkeen käydään lävitse invertterin valinta ja johdotukset energiajärjestelmään.

4.1.1 Sijainti ja maasto

Maatila sijaitsee Etelä-Savon maakunnassa Kangasniemen kunnassa. Sijainti on tärkein tekijä aurinkovoimalaitoksen suunnittelun kannalta, koska sijainti kertoo kuinka paljon aurinkon säteilysumman suuruuteen. Maatilan koordinaatit ovat $61^{\circ}54'16.2''\text{N}$ $26^{\circ}42'27.0''\text{E}$. alueen säteilysumma on noin 1000 kWh/m^2



Kuva 1 tilan sijainti suomen kartalla

Jotta aurinkovoima laitos on järkevää rakentaa alueelle, on selvitettävä maaston sopivuus siihen. Kuvasta 2 voidaan päätellä, että rakennukset, joiden katot ovat länsi-itä suunnassa soveltuvat aurinkopaneelien asennusta varten. On kuitenkin huomioitava, että navetan pohjoispäätyyn syntyy huomattavaa varjostusta sen länsipuolella olevan puun takia. Nämä huomioon ottaen aurinkovoimalaitokselle on kolme mahdollista asennuskohdetta. Kuvan alareunassa oleva rehusiilo, siilon yläpuolella navetan eteläharjanne tai kuvan L kirjaimen muotoinen työpaja. Tilaa ympäröivät peltoalueet ovat lypsykarjan ruokinta-alueita, jonka takia eivät sovellu paneelien sijoituskohteiksi.



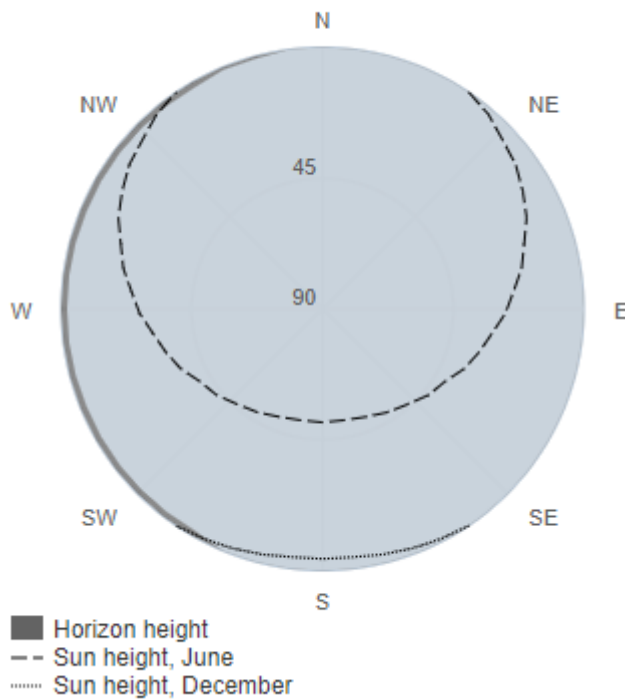
Kuva 2 maatilan ympäristö pohjois-etelä suunnassa (Google maps)

Jotta asennuskohde voidaan tarkemmin määritellä, täytyy selvittää rakennusten kattojen pinta-alat. Rehusiilon länsiharjanteen pinta-ala on n. 240 neliometriä, navetan eteläosan länsiharjanteen pinta-ala n. 500 neliometriä ja työpajan länsiharjanteen kattopinta-ala on noin 80 neliometriä. Pienen pinta-alansa vuoksi rajataan työpajan katto pois aurinkovoimalaitoksen suunnittelusta. Muita huomioitavia tekijöitä maastossa on se, että navetta on rakennettu matalammalle korkeudelle kuin rehusiilo, jonka vuoksi auringon paistaessa matalammalta navetan länsiharjanne on varjossa puitten takia. Jotta varjostuksen takia aiheutuvat tehohäviöt saataisiin minimoitua, käytetään aurinkovoimalaitoksen kattopintana rehusiilon kattoa.

4.1.2 Paneelien asennustapa ja tyyppi

Rakennuksen katto on itä-länsi suunnassa, jolloin atsimuutti eli suuntaus itä-länsi suunnassa 90 astetta. Kuvasta 3 nähdään, miten auringon valo osuu paneeleihin eri ilman suunnista ja

miten paneelien kaltevuus vaikuttaa siihen. Tällöin aurinkopaneelien kulman kasvattaminen heikentää vähentää sähkötehoa. Tämän vuoksi paneelit asennetaan katonharjanteen suuntaisesti, jotta suuntauksesta johtuvat tuotantohäviöt saadaan minimoitua. Tämän perusteella paneelien asennustavaksi valitaan kiinteä asennustapa.



Kuva 3 Astimuutti horisontti kuvaaja (PVGIS)

Aurinkopaneelin valinnassa on tiedettävä sen tyyppi, hinta, pinta-ala ja nimellisteho, joiden perusteella valitaan, minkä valmistajan paneelit valitaan voimalaitoksen toteuttamiseksi. Erinäisiä paneeleita on listattu alla olevaan taulukkoon.

Taulukko 1 Aurinkopaneelit

Paneeli	Teho [W]	paneelin pinta-ala [m ²]	Hinta [€]
Astroenrgy 410W HC PERC	410	1,953	225
LONGI HI-MO5 405 W MUSTA	405	1,953	215
Jasolar 410W Hc Perc Fullblack	410	2,009	235
Solitek Solid Bifacial B60 366 GG	360	1,857	349

Koska paneelit asennetaan katolle toistensa kanssa limittäin, varjostus paneelien välillä jää mitättömäksi. Tällöin rehusiilon katolle asennettavien aurinkopaneelien kokonaispinta-ala

saadaan laskettua, kun mitoittavana tehona käytetään tilalla jo olemassa olevan aggregaatin nimellistehoa, joka on 23 kVA. Tällöin paneelien lukumäärä saadaan seuraavasta yhtälöstä

$$N_{paneeli} = \frac{P_g}{P_{paneeli}} \quad (1)$$

Tällöin saadaan paneelien lukumääräksi ja pinta-aloiksi seuraavan taulukon mukainen

Taulukko 2 Aurinkopaneelien lukumäärä ja pinta-alat

Paneeli	Teho [kW]	N[kpl]	pinta-ala [m ²]
Astroenrgy 410W HC PERC	23,37	57,0	111,3
LONGI HI-MO5 405 W MUSTA	23,085	57,0	111,3
Jasolar 410W Hc Perc Fullblack	23,37	57,0	114,5
Solitek Solid Bifacial B60 366 GG	23,04	64,0	118,8

Laskettujen pinta-alojen perusteella aurinkopaneelit mahtuvat rehusiilon katolle. Käytettäväksi aurinkopaneeliksi valitaan LONGI paneeli, koska sillä toteutettu voimalaitos vastaa parhaiten aggregaatin nimellistehoa ja on vaihtoehtoista halvin. Mikäli markkinoille tulisi halvempia paneeleita on suotavaa käydä tarkastelu uudelleen.

4.1.3 Energiavaraston mitoitus

Maatilalla sähkönkulutus keskittyy aamu ja ilta lypsyn ajankohtiin, jolloin tilan kuluttama sähköteho on suurimmillaan. Nämä ajankohdat ovat aamu viiden ja kahdeksan sekä iltapäivä neljän ja kuuden välillä. Tällöin suurin osa päivän aurinkoenergian tuotoista jää hyödyntämättä tilan omaan tarpeeseen, jolloin tilalla joudutaan käyttämään enemmän verkosta ostettua sähköä. Jotta suurin osa aurinkoenergiasta saataisiin hyödynnettyä, täytyy se varastoida.

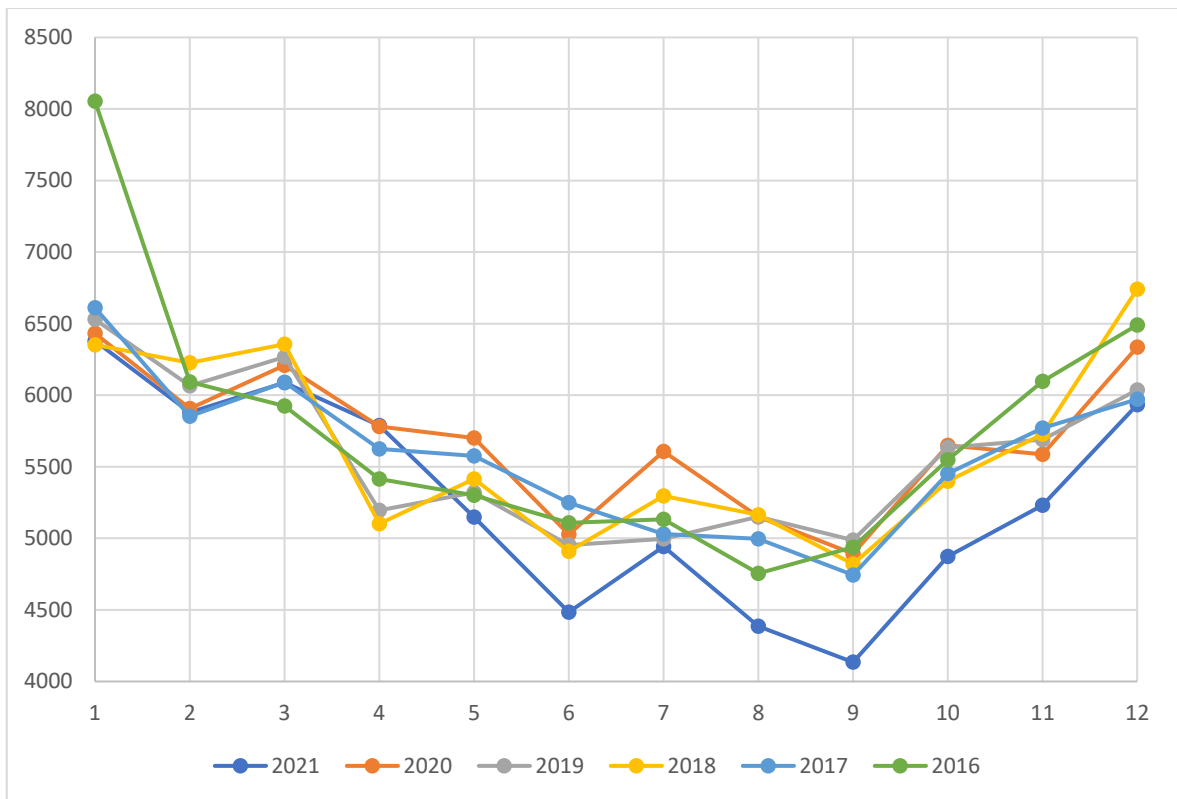
Taulukossa 3 on esitetty maatilalla sähköenergian kulutus kilowattitunteina vuosilta 2016–2021, joiden perusteella määritellään energiavaraston koko luokka.

Taulukko 3 Maatilan energian kulutus

Vuosi	2021	2020	2019	2018	2017	2016
Tammikuu	6380	6432	6530	6352	6611	8055

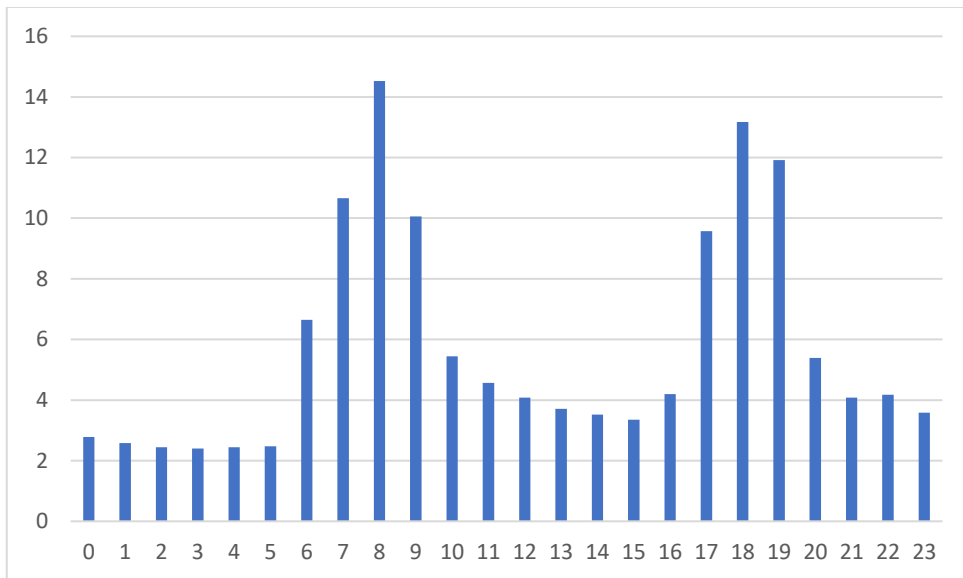
Helmikuu	5880	5907	6066	6227	5854	6093
Maaliskuu	6089	6208	6267	6356	6090	5925
Huhtikuu	5788	5781	5196	5101	5624	5415
Toukokuu	5148	5700	5321	5414	5575	5300
Kesäkuu	4484	5028	4953	4910	5250	5109
Heinäkuu	4943	5607	4997	5296	5031	5133
Elokuu	4387	5150	5152	5164	4997	4755
Syyskuu	4135	4893	4988	4821	4744	4939
Lokakuu	4874	5650	5633	5400	5453	5548
Marraskuu	5232	5588	5691	5727	5770	6096
Joulukuu	5933	6336	6037	6741	5972	6490
yht (kWh)	63272	68280	66831	67509	66971	68858
MWh	63,272	68,280	66,831	67,509	66,971	68,858

Jotta tieto olisi helpommin luettavissa olevassa muodossa tehdään siitä kuvaaja, jossa näkyy vuosittaiset kulutukset jokaiselta kuukaudelta. Kesäkuun huomattavasti pienempi energian kulutus johtuu useiden myrskyjen aiheuttamista sähkökatkoista, sekä siitä, että maatilalla käytössä oleva maalämpö pumppu rikkoutui salaman aiheuttaman virtapiikin takia.



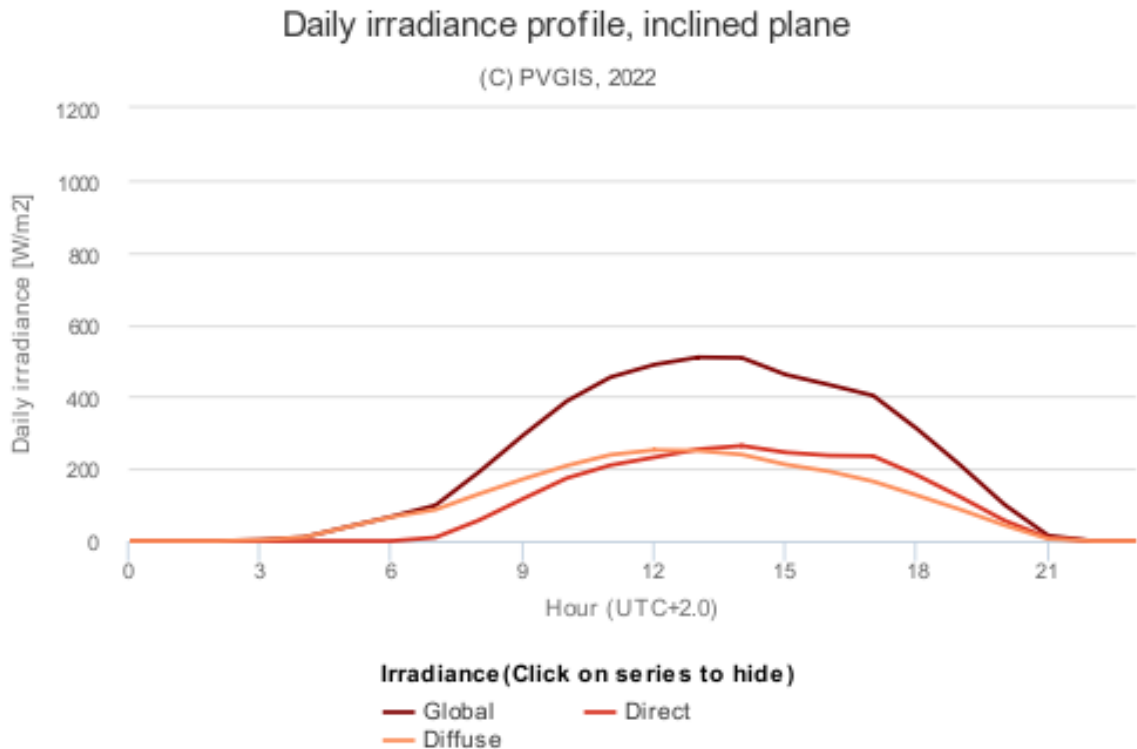
Kuva 4 kuukausittaiset energiankulutukset

Kuvaajasta nähdään, että maatalan oma energiankulutus on pienemmillään syyskuussa ja suurimmillaan joulukuun ja tammikuun aikana. Aurinkoenergian tuotanto keskittyy kuitenkin kesäkuukausille. Kesä-elokuun tuntikohtaisen sähkön kulutuksen keskiarvon perusteella saadaan seuraavan näköinen kuvaaja



Kuva 5 maatalan tuntikohtainen kulutus

Kuvaajasta nähdään, että kuormat keskittyvät aamu- ja iltalypsyn ajankohtaan. Pienemmillään energiankulutus on juuri ennen aamulypsyä. Alla olevassa kuvassa on auringon säteilystä kertyvä säteilysumma kesäkuussa, kun katon atsimuutti on 90 ja kulma on 25 astetta



Kuva 6 Auringon säteily summa (PVGIS)

Verrattaessa säteilysumman ja kulutuksen käyrästä huomataan, että suurin osa mahdollisen aurinkovoiman energiasta tuotetaan kulutushuippujen ulkopuolella. Tällöin tuotettu sähkö jouduttaisiin myymään sähköverkkoon, jolloin tuotannosta saatu hyöty jää pienemmäksi, koska sähkönmyynnistä saatu tulo on merkittävästi pienempi, kuin omaan käyttöön kautta saatu säästö sähkölaskusta. Koska suunniteltavalle aurinkovoimalaitokselle ei ole olemassa omaa tuntikohtaista sähkön tuotantodataa olemassa, mitoitetaan energiavaraston suuruudeksi kello 17:00–20:00 aikana käytetty sähköenergia, jonka suuruus on 40 kWh. Tämän kokoluokan energiavaraston sisältämällä energialla pystytään toteuttamaan tilan tärkeimmät toiminnot, jos energiavarasto on saatu ladattua täyteen ennen illan kulutus huippua.

Edellä käydyn tarkastelun pohjalta energiavarastoksi valitaan BYD B-Box Premium HVM 22.1 energiavarasto, joita kytetään rinnakkain 2 jolloin energiavaraston kokonaiskapasiteettiä saadaan 44.2 kWh. Tämän lisäksi energiavaraston myyjä kertoo energiavaraston soveltuvan tilanteisiin, missä se toimisi tilan varavoimalana sähkökatkon aikana, mikä vähentäisi tarvetta käyttää aggregaattia. Tästä huolimatta kyseisen toiminnon käyttömahdollisuus pitää selvittää verkon hallitsijalta, koska normaalisti aurinkovoimalaitos on kytkettävä pois päältä, ettei verkkoon pääse virtaa mahdollisten huoltotöiden ajaksi.

4.1.4 Johdotukset ja invertterin valinta

Jotta energiajärjestelmä saadaan kytkettyä verkkoon, täytyy sille määrittää johdotukset ja invertteri. Tässä työssä ei käydä tarkemmin johdotuksien sähkötekniisiä ominaisuuksia ja poikkipintoja, Tässä mitoitusyössä ei käydä lävitse sähköturvallisuuteen liittyviä mitoituksia voimalaitoksen johdotuksille, mutta miten johdot tulisi asentaa voimalaitokselle. Aurinkopaneelien johdotukset tulisi kytkeä mahdollisimman suorassa linjassa ja yhdistää paneelien kiinnike raiteisiin. Paneeleilta johdotukset tulisi kulkea sekä invertterille, että energiavarastolle siten, että invertteri sijaitisi mahdollisimman lähellä energiavarastoa ja paneeleita. Tällöin pystytään minimoimaan johdotuksista johtuvat resistiiviset häviöt.

Invertterin valinnassa on tiedettävä aurinkoenergiajärjestelmän teho. Invertterin tehon kannattaa olla mahdollisimman lähellä aurinkovoimalaitoksen omaa tehoa, eikä sitä ole järkevää ylimitoittaa, ellei voimalaitosta ole tarkoitus laajentaa lähivuosina. Koska mitoittavan järjestelmän aurinkopaneelit asennetaan länsiharjanteelle, ei paneelien teho saavuta niille mitoitettua huipputehoa. Näiden tekijöiden vuoksi järjestelmään kytkettävä invertteri alimitoitetaan markkinoilta löytyvään 20 kW invertteriin, Invertteriksi valittiin SMA STP X 20-50 20kW invertteri.

4.2 Voimalaitoksen simulointi

Voimalaitoksen simuloinnissa käytetään SMA nimisen yrityksen tekemää Sunny Design ohjelmistoa, jonka avulla voidaan simuloida aurinkovoimalaitoksen tuotantoa, sekä suunnitella aurinkopaneelien tarkkaa sijoitusta rakennuksen katolle. Simulaatio ohjelmistojen antamat tulokset eivät vastaa todellisen voimalaitoksen omaa tuotantoa, mutta antaa pohjan sille ja sen arvioinnille. Tulosten perusteella on kuitenkin mahdollista arvioida aurinkovoimalaitoksen kuukausittaista energian tuottoa ja omakäyttöastetta sille. Sunnydesign ohjelmistossa on mahdollista käyttää eri valmistajien aurinkopaneeleja simuloinnissa. Edellä mainittujen asioiden lisäksi ohjelmistossa voidaan tarkastella energiavaraston vaikutusta omakäyttöasteeseen, mutta valikoimassa on vain muutama valmistajan oma energiavarasto, minkä vuoksi se ei täysin vastaa mitoituksessa valittua järjestelmää.

Ensin valitaan kartalta, minne voimalaitos on tarkoitus sijoittaa ja siirrytään kartan kautta kyseisiin koordinaatteihin. Seuraavaksi mitoitusohjelmistoon syötetään vuosittainen energian kulutus ja valitaan kuormaprofiilin tyyppin ja käyttötarkoituksen mukaan.

Information: the address can be changed by moving the marking or by clicking with the right mouse button in the map.

Map Satellite

Google

Keyboard shortcuts Map data ©2022 Imagery ©2022, Maxar Technologies Terms of Use Report a map error

Voltage level *

Low voltage Medium voltage

Inverter grid connection ⓘ

230V (230V / 400V)

Preferred minimum nominal power ratio ⓘ

< 100 > %

Load profile details

Type of load profile *

Commercial business + New load profile

Load profile

Agricultural business with dairy farming

Annual energy consumption

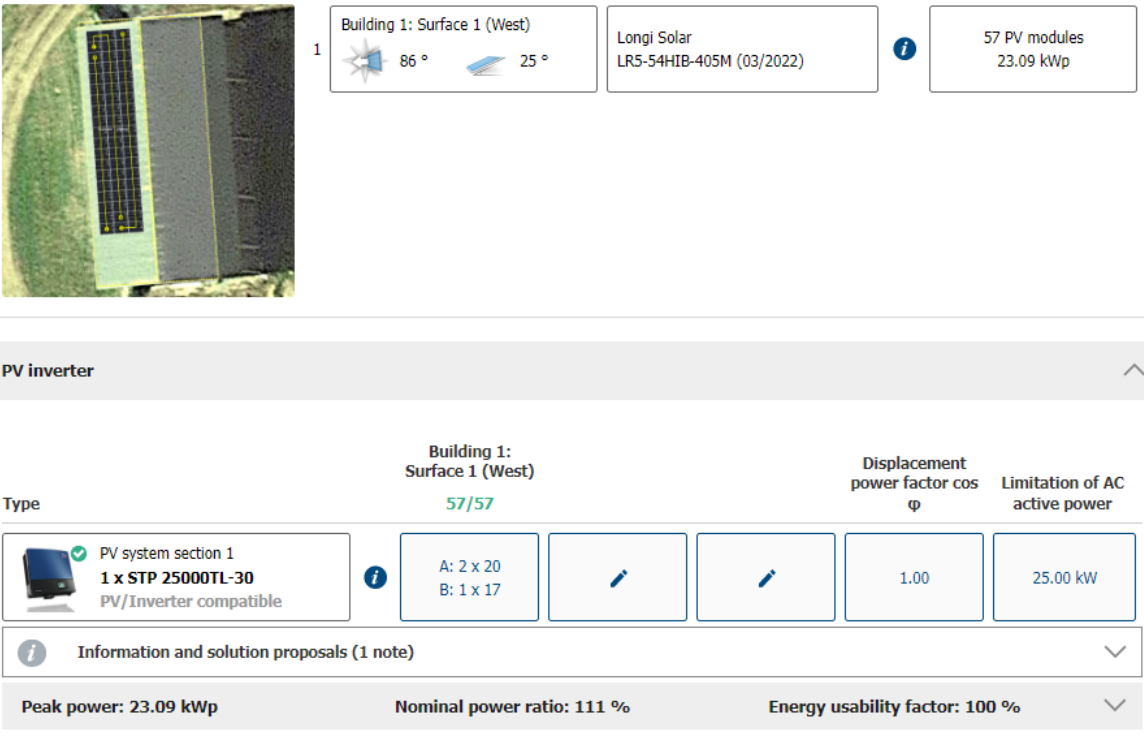
< 67000 > kWh

Description

Dairy farms with energy consumption based on milking twice daily and subsequent cooling.

Kuva 7 Käyttöpaikan lisääminen ohjelmaan

Kun paikka ja kulutustieto parametrit on asetettu, määritetään rehusiilon tiedot ohjelmistoon, eli siilon korkeus, leveys, pituus, atsimuutti ja katonharjanteen kulma. Tämän jälkeen määritellään mahdolliset rakenteelliset rajoitukset katolla, joiden päälle ei paneeleja voi asentaa. Kun rajoitukset ovat määritetty siirrytään paneelien asentamiseen katolle ja määritellään paneelien etäisyydet toisistaan ja asetetaan paneelin tyyppiä LR5-54HIB-405M paneeli, joka on kohdan 4.1.1 lopussa määritelty paneeli. Viimeisenä ohjelmisto määrittelee johdotukset ja invertterin paneeleille.



Building 1: Surface 1 (West) 1


86 ° 25 °

Longi Solar
LR5-54HIB-405M (03/2022)

57 PV modules
23.09 kWp

PV inverter

Building 1:
Surface 1 (West)
57/57

Type	Displacement power factor cos ϕ	Limitation of AC active power
 PV system section 1 1 x STP 25000TL-30 PV/Inverter compatible	A: 2 x 20 B: 1 x 17	25.00 kW

Information and solution proposals (1 note)

Peak power: 23.09 kWp Nominal power ratio: 111 % Energy usability factor: 100 %

Kuva 8 Katolle mallinettu aurinkovoimalaitos

Aurinkovoimalaitoksen ja määrittelyn jälkeen määritellään energiavaraston parametrit. Tässä tapauksessa syötetään energiavaraston kapasiteetiksi kohdassa 4.1.2 määrittely energiavaraston koko, joka on 44.2 kWh. Tämän jälkeen ohjelmistolla voitaisiin analysoida aurinkopaneelien ja energiavaraston kustannuksien avulla kannattavuutta, mutta se lasketaan tässä työssä erikseen. Mallinnuksen pohjalta saadaan määriteltyä voimalaitoksen vuosituotanto ja sähköenergian omakäyttöaste. Mallinnuksen pohjalta saadaan seuraavien kuvien mukaiset tulokset.

Total number of PV modules	57	Performance ratio	87.7 %
Peak power	23.09 kWp	Spec. energy yield	780 kWh/kWp
Number of PV inverters	1	Line losses (in % of PV energy)	---
Nominal AC power of the PV inverters	25.00 kW	Unbalanced load	0.00 VA
AC active power	25.00 kW	Annual energy consumption	67,200 kWh
Active power ratio	108.3 %	Self-consumption	13,795 kWh
Annual energy yield	17,996 kWh	Self-consumption quota	76.7 %
Additional yield with SMA ShadeFix	0 kWh	Self-sufficiency quota	20.5 %
Energy usability factor	100 %	CO ₂ reduction after 20 years	121 t

Kuva 9 simuloinnin tulokset ilman energiavarastoa

Project information			
Total number of PV modules	57	Spec. energy yield	780 kWh/kWp
Peak power	23.09 kWp	Line losses (in % of PV energy)	---
Number of PV inverters	1	Unbalanced load	0.00 VA
Nominal AC power of the PV inverters	25.00 kW	Annual energy consumption	67,200 kWh
AC active power	25.00 kW	Self-consumption	16,528 kWh
Active power ratio	108.3 %	Self-consumption quota	91.8 %
Annual energy yield	17,996 kWh	Self-sufficiency quota	23.6 %
Additional yield with SMA ShadeFix	0 kWh	Total nominal capacity	44.20 kWh
Energy usability factor	100 %	Annual nominal energy throughputs of the battery	62
Performance ratio	87.7 %	CO ₂ reduction after 20 years	121 t

Kuva 10 simuloinnin tulokset energiavaraston kanssa

Simulaatiosta saatavien tulosten perusteella energijärjestelmä pystyy kattamaan noin neljänneksen omasta sähkön kulutuksesta, mikäli omakäyttöaste olisi 100 %. Energiavarastolla varustettu voimalaitos saavuttaa 91,8 %:in omakäyttöasteen, kun se olisi muutoin 76,7 %.

5 Kustannuslaskenta

Tässä osiossa käydään lävitse aurinkovoimalaitoksen investointikustannuslaskenta, johon kuuluu energijärjestelmän komponenttien eli aurinkopaneelien, invertterin, energiavaraston, asennuksen ja arvio järjestelmän käyttöön kustannuksista. Kustannuslaskennassa otetaan huomioon maatalouden investointituki aurinkosähköjärjestelmän hankintaan mikä on n. 40 % verottoman investoinnin kokonaishinnasta.

Investointikustannusten jälkeen lasketaan aurinkoenergiajärjestelmälle takaisinmaksuaika simuloinnista saadun omakäyttöasteen ja maatilan kiinteän sähkösopimuksen perusteella. Takaisin myydyn sähkön hinta määräytyy pörssisähkön hinnastojen mukaisesti, minkä vuoksi sen kautta takaisin saadun sähkön hinta vaihtelee merkittävästi ja on sen vuoksi haastavaa arvioida. Tilalla on omaa pääomaa 60 000 € investointia varten.

5.1 Aurinkovoimalaitoksen kustannuslaskenta

Aurinkovoimalaitoksen komponenttien kustannukset on listattu verottomana ja verollisena hintana alla olevaan taulukkoon.

Taulukko 4

	Veroton	verollinen	kpl	yht veroton	yht verollinen
paneelit 405 W	173,39	215	57	9883,23	12255
invertteri 20 kW	2653,23	3290	1	2653,23	3290
energiavarasto 22,2kWh	14193,55	17600	2	28387,10	35200

Tällöin veroton kokonaisinvestointihinta olisi 40923,56 € ja verollinen investointihinta 50 745 €. Koska järjestelmän veroton investointihinta ylittää ELY-keskuksen asettaman minimin, joka on 17 500 € voidaan energijärjestelmälle hakea tukea energijärjestelmälle. Oletetaan tuen suuruudeksi 40 %, mutta lasketaan myös tuettomalle investoinnille takaisinmaksuaika. Koska voimalaitokseen ei löytynyt avaimet käteen periaatteella toimivaa ratkaisua, arvioidaan asennusten kokonaiskustannuksiksi 5000 €. Koska invertteri pitää vaihtaa kertaalleen voimalaitoksen käyttöiän aikana täytyy se ottaa huomioon laskettaessa takaisinmaksu aikaa. Tällöin järjestelmän kustannukseksi tulee tuettuna 38 737 € ja ilman tukia 59 035

Voimalaitoksen energian tuotanto on noin 17 966 kWh, josta 91,8 % voidaan hyödyntää energiavaraston avulla. Huoltokustannukseksi voimalaitokselle arvion 1 % vuodelta ja paneelien ikääntymisen aiheuttama häviö on ensimmäiselle vuodelle 3 % ja lopulle käyttöiästä 0,55 % per vuosi. Ylijäämäisen sähkön myynnin tuotoksi arvioin 8 snt/kWh. Ostettavan sähkön hinta maksaa tilalle siirtohintoineen 20 snt/kWh. Tällöin vuosittaiseksi säästökseen saadaan seuraavan yhtälön mukainen summa.

$$S = k_s \cdot E \cdot k_{osto} + (1 - k_s) \cdot E \cdot k_{myynti} - 0,01 \cdot \frac{1}{a} \cdot K \quad (2)$$

Yhtälössä S on vuosittainen säästö sähkön kulutuksessa, k_s on omakäyttöaste, E on tuotettu aurinkoenergia vuodessa, k on sähkön hinta ja K on voimalaitoksen investointi hinta. Alaindeksi osto kuvaa ostetun sähkön hintaa ja myynti verkkoon takaisin myydyn sähkön hintaa. Tuotettu sähköenergiassa pitää ottaa huomioon paneelin ikääntyminen ja se voidaan ottaa huomioon seuraavan yhtälön avulla

$$E = E_0 \cdot (\mu_1 + \mu_n^a) \quad (3)$$

Missä E_0 on voimalaitoksen energian tuotanto ensimmäisenä vuonna, μ_1 ensimmäisen vuoden tehohäviö voimalaitokselle ja μ_n^a on toisesta vuodesta eteenpäin. Tällöin vuosittaiseksi

energian säästökseen saadaan ensimmäiselle vuodelle 3121 €/a. Energiavarastottomalle järjestelmälle vuosittaisen säästön suuruus on 2971 €/a. Koroton takaisinmaksuaika lasketaan seuraavan yhtälön avulla.

$$t = \frac{K}{S} \quad (4)$$

Sijoittamalla yhtälöön 4 voimalaitoksen investointihinta ja vuosittainen energiansäästö saadaan takaisinmaksu ajaksi tuetulle energiajärjestelmälle n 14 vuotta ja tukemattomalle energiajärjestelmälle n. 22 vuotta.

Mikäli energiavarasto jätetään pois maatilalan aurinkoenergiajärjestelmästä, omakäyttöaste tippuu 76,7 %:iin ja systeemin hinta putoaa verottomana 12 536,46 euroon ja verollisena 15 545 euroon. Tällöin projektille ei saada tukea, mutta sille saadaan kuitenkin takaisinmaksuajaksi n. 9 vuotta.

5.2 Investointilaskennan arviointi

Mikäli energiajärjestelmään ei saada tukea ELY-keskukselta rakentamiseen ei kannattaisi ryhtyä, ellei verkosta ostettavan sähkön hinta nouse merkittävästi. Myös tuettuna aurinkoenergiajärjestelmän kannattavuus on heikko. Aurinkovoimalaitoksen kannattavuuteen vaikuttaa tässä työssä eniten siihen mitoitettu energiajärjestelmä, jonka osuus koko järjestelmän hinnasta on 59,6 %. Tästä voidaan päätellä, että energiavaraston asentamiseen täytyy olla todella selkeät perusteet, sillä muuten siihen on investoitu turhaan.

Toisaalta energiajärjestelmän kannattavuuteen vaikuttaa myös sähkön osto -ja myyntihinta, joiden arvot ovat nykyisen maailman tilanteen ja pörssisähköhintojen puitteissa todella matalat. Tämänkin takia Takaisinmaksuajat pitkittyivät yli lähemmäs kahtakymmentä vuotta tavallisen pientuotantolaitoksen 10 verrattuna.

6 Johtopäätökset

Tutkimuksessa päästiin sen päätavoitteisiin eli aurinkoenergiajärjestelmä saatiin mitoitettua ja sen kustannuslaskennat suoritettua., Tämän kokoluokaksi tuli tuotantoteholtaan 23 kWp

ja varastokapasiteetilta 44,4 kWh energiavarasto maatilalle ja sen kustannukseksi tulisi 38 737 euroa tai 59 035 euroa mikäli ELY-keskukselta ei saataisi projektiin 40 % investointitukea. Tutkimuksen perusteella maatilalle ei olisi järkevää rakentaa aurinkoenergiajärjestelmää ennen kuin energiavarastojen hinnat laskevat nykyisestä. Mikäli energiavarasto jätetään pois energiajärjestelmästä, olisi aurinkovoimalaitoksen rakentaminen maatilalle kannattava päätös.

Lähteet

- Roy, J. (2018) *Solar Photovoltaic Technology*. (9789811071874), 21–56. Luettu 14.11.2022 Saatavissa: https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/chapter/10.1007/978-981-10-7188-1_2
- Kosonen, A. & Breyer, C. 2019. Aurinkoenergia ja aurinkosähkö Suomessa. Luettu 16.11.2022 Saatavissa: <https://www.lut.fi/fi/artikkelit/aurinkoenergia-ja-aurinkosahko-suomessa>
- Ouyang, W. (2019) Enhancing the Photoelectric Performance of Photodetectors Based on Metal Oxide Semiconductors by Charge-Carrier Engineering. *Advanced functional materials*. 29 (9), Luettu 21.11 Saatavissa: <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.cc.lut.fi/doi/full/10.1002/adfm.201807672>
- Child, M. (2017) The Role of Solar Photovoltaics and Energy Storage Solutions in a 100% Renewable Energy System for Finland in 2050. *Sustainability*. 9 (8), Luettu 22.11 Saatavissa: <https://www.mdpi.com/2071-1050/9/8/1358>
- Sun, X. (2018) Optimization and performance of bifacial solar modules: A global perspective. *Applied energy*. 2121601–1610. Luettu 22.11. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0306261917317567?via%3Dihub>
- Aneke, M. & Wang, M. (2016) Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied energy*. [Online] 179350–377. Luettu 23.11 Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0306261916308728?via%3Dihub>
- PVGIS Luettu 24.11 saatavissa: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/pvgis-online-tool_en
- SunnyDesign Luettu 24.11 saatavissa: <https://www.sunnydesignweb.com/sdweb/#/Home>