

OFF-GRID-JÄRJESTELMÄN YHTEENSOVITTAMINEN
OKT-LUOKASSA

Off-grid system sizing for a detached house

Erkki Minkkinen

TIIVISTELMÄ

LUT Yliopisto
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Erkki Minkkinen

Offgrid-järjestelmän yhteensovittaminen OKT-luokassa
2019

Kandidaatintyö.

38 s.

Ohjaajat: Tutkijaopettaja Antti Kosonen, Toni Hannula

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Antti Kosonen

Tämän tutkimuksen tavoitteena on mitoitaa kahdelle erityyppiselle omakotitalolle sähkönjakeluverkosta erillään oleva off-grid-järjestelmä. Kohteena on 20 MWh vuodessa kuluttava sähkölämmitteinen omakotitalo ja 7.5 MWh vuodessa kuluttava maalämpölämmitteinen nollaenergiahirsitalo. Tutkimusmenetelminä on kirjallisuustutkimus ja simulaatio. Kirjallisuustutkimuksessa perehdytään jo olemassa oleviin off-grid-järjestelmiin ja niihin sopivien tuotantojärjestelmien investointikustannuksiin. Simulaatio-osiossa simuloidaan aurinko- ja tuulivoiman sähköntuotantoa. Simulaation ja kohteiden kulutusprofiilien avulla luodaan Excel-pohjainen mitoitustyökalu, jolla selvitetään kohteiden sähkönkulutuksen vaihtelu eri vuodenaikoina ja simuloitua tuotantodataa skaalaamalla selvitetään, kuinka suuri tuotantojärjestelmä vaaditaan kulutuksen kattamiseksi. Lisäksi selvitetään sähkönvarastointikapasiteetin tarve millä katetaan lopullinen järjestelmästä jäävä lisäenergian tarve.

Tuloksena voidaan todeta, että off-grid-järjestelmän toteuttaminen on mahdollista. Tärkeää off-grid-järjestelmässä on ohjata kulutus tuotannon ajankohtiin, jolloin tuotantojärjestelmän koko ja sähkönvarastoinnin tarve pienenee. Työssä mitoitetuilla järjestelmillä kohteet kykenisivät toimimaan omavaraisesti energiatasolla kaikkina vuodenaikoina. Tällä hetkellä off-grid-järjestelmä voisi olla varteenotettava vaihtoehto, jos sähköverkkoon liittymisen kustannukset olisivat normaalia suuremmat. Kannattavuuden osalta vaadittaisiin kuitenkin tarkempaa analyysiä ja optimoitua mitoitusta järjestelmästä. Jos tulevaisuuden hintakehitys uusiutuvilla energianlähteillä ja akuilla jatkaa nykyistä suuntaa, off-grid-järjestelmät voisivat olla varsin kannattava vaihtoehto perinteisille on-grid-omakotitaloille.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Erkki Minkkinen

Off-grid system sizing for a detached house

2019

Bachelor's Thesis.

38 p.

Instructors: Associate professor Antti Kosonen, Toni Hannula

Examiner: Associate professor Antti Kosonen

The objective of this bachelor's thesis is to size an off-grid system for two different types of detached houses. The houses are an electrically heated house with an annual energy consumption of 20 MWh and a geothermally heated zero-energy timber house with an annual energy consumption of 7.5 MWh. Research methods used in this thesis are simulation and literature research. In the literature research the focus is on current types of off-grid systems and the investment costs of different energy production systems for off-grid systems. In the simulation solar panels and wind turbines energy production is simulated. With the simulation data and the houses energy consumption data an Excel-based tool is made to reconcile the houses energy consumption and the scaled off-grid systems energy production. The tool is used to find out the variability of energy consumption in different seasons and the size of the off-grid system, It is also used to find out the need for energy storing and how to cover the remaining need for additional energy.

The main result in this thesis is that it is possible to use an off-grid system in a detached house. In off-grid systems it is important to direct the consumption to the hours of production to reduce the size of the system and the need for energy storing. The systems sized in this thesis are capable of operating self-sustainably through all times of the year, when viewed on an energy basis. At the moment an off-grid system could be a worthy alternative if the investment for integrating to the electrical network is higher than normal. In terms of profitability, it would need a deeper analysis and optimized sizing of the system. If renewable energies production costs keep lowering as they have been, off-grid systems could be a very profitable alternative to the traditional on-grid systems for detached houses.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	6
2.	Järjestelmät.....	6
2.1	On-grid-järjestelmä.....	7
2.2	Off-grid-järjestelmä.....	7
3.	Omakotitalojen kulutus.....	8
3.1	Sähkölämmitteinen omakotitalo.....	8
3.2	Nollaenergiahirsiotalo.....	10
3.3	Tuotantomenetelmät.....	12
4.	Simulaatiot ja Mitoitus.....	14
4.1	Oletukset ja rajaukset.....	14
4.2	Tuotannon simulointi.....	15
4.2.1	Aurinkovoiman simulointi.....	15
4.2.2	Tuulivoiman simulointi.....	16
4.3	Mitoitustyökalu.....	17
4.4	Järjestelmän mitoitus sähkölämmitteiselle omakotitalolle.....	19
4.5	Järjestelmän mitoitus nollaenergiahirsiotalolle.....	24
4.6	Nollaenergiahirsiotalo nykyisellä tuotantojärjestelmällään.....	30
5.	Johtopäätökset.....	32
	Lähteet.....	34

Liitteet

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

ESE	Etelä Savon Energia Oy
HHV	higher-heating-value, korkeampi lämpöarvo
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, Sähkötekniikan ja elektronikan insinöörien instituutti
LCOE	Levelized cost of energy, energian tuotantohinta
PV	Photovoltaic, aurinkosähkö

1. JOHDANTO

Off-grid-järjestelmiä eli sähköjakeluverkosta erillään olevia omia verkkoja käytetään tehon lähteenä silloin, kun järjestelmän liittäminen sähköjakeluverkkoon vaatii suuret investoinnit hyötyyn nähden, halutaan saavuttaa matalat käyttökustannukset tai halutaan suosia uusiutuvaa energiaa (Misak 2010). Suomessa off-grid-järjestelmiä käytetään mökkien ja vapaa-ajan asuntojen sähköistämiseen ja sähkön tuottamiseen asuntovaunuissa ja veneissä. (Lehto 2017). Lisäksi esimerkiksi Intiassa pieniä off-grid-järjestelmiä on käytetty talojen sähköistämiseen maaseudulla, missä sähköverkkoa ei ole olemassa (Nagarjun 2015).

Tämän tutkimuksen tavoitteena on mitoitaa omakotitalolle sähköjakeluverkosta erillään oleva off-grid-järjestelmä, joka pystyy itsenäisesti vastaamaan omakotitalon muuttuvaan kuormitukseen eri vuodenaikoina. Tutkimuksen kohteena on kaksi omakotitaloa, joista toinen on sähkölämmiteinen omakotitalo ja toinen maalämmöllä lämmitetty nollaenergiahirsi-talo. Tutkimuksessa tutustutaan talojen sähkönkulutuksen vaihteluun eri vuodenaikoina ja selvitetään, mitä tuotantomenetelmiä tarvitaan vastaamaan kulutukseen. Lisäksi selvitetään, kuinka paljon sähköä on hyödyllistä tuottaa aurinko- ja tuulivoimalla, millä katetaan aurinko- ja tuulivoimasta jäävä ajallinen tuotantovaje ja kuinka paljon tarvitaan sähkön varastointikapasiteettia. Lopuksi tutkimuksessa pohditaan järjestelmän kannattavuutta.

Tutkimuksessa simuloidaan aurinko- ja tuulivoiman tuotanto käyttäen Homer Energy-ohjelmistoa, NASA:n säteilytietokantaa ja Tuuliatlaksen tuulitietokantoja. Kirjallisuustutkimuksessa perehdytään IEEE:n tietokannan avulla jo olemassa oleviin off-grid-järjestelmiin ja arvioidaan mitä tuotantomenetelmiä omakotitalon sähköntuotannossa voitaisiin käyttää, sekä tarkastellaan eri tuotantomenetelmien investointikustannuksia. Investointikustannusten tarkastelussa käytetään eri jälleenmyyjien verkkokauppoja. Kandidaatintyö tehtiin tilaustyönä Etelä-Savon Energia Oy:lle.

2. JÄRJESTELMÄT

Sähkönsyöttöön käytettävät järjestelmät voidaan jakaa yleiseen sähköverkkoon liitettyyn on-grid-järjestelmään ja sähköverkosta erillään olevaan off-grid-järjestelmään. Järjestelmiä tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin.

2.1 On-grid-järjestelmä

On-grid-järjestelmiä käytetään yleisen sähkönjakeluverkon rinnalla. On-grid-järjestelmässä tuotetaan sähköä omaan käyttöön yleensä aurinkopaneeleilla, tuulivoimalla tai näiden yhdistelmällä. On-grid järjestelmässä tuotettu sähkö käytetään joko itse, tai tuotannon ylittäessä kuormituksen sähkö myydään energiayhtiölle. On-grid-järjestelmän mitoittaminen on helpompaa kuin off-grid-järjestelmän, koska sähkönjakeluverkko toimii pääenergianlähteenä, jolloin tuotantoa ei tarvitse mitoittaa riittämään kuormitukselle yksinään. On-grid-järjestelmissä aurinkopaneelit on kytketty vaihtosuuntaajan eli invertterin kautta sähkönjakeluverkkoon. (Lehto 2017) On-grid-invertterit ovat sähköverkon rinnalle tahdistuvia laitteita. Sähköverkkoon kytkettävien mikrotuotantolaitteistojen täytyy täyttää niiltä vaadittavat tuotantostandardit, kuten esimerkiksi VDE-AR-N 4105 2011-8. Lisäksi suosituksena mikrotuotantolaitteiston tulisi täyttää standardi SFS-EN 50438 (ESE 2018).

2.2 Off-grid-järjestelmä

Off-grid- eli saarekejärjestelmässä energiavarastona toimii akusto, jota ladataan tuotannon ollessa kulutusta suurempi ja vastaavasti akustoa käytetään energialähteenä, kun kulutus ylittää tuotannon. Energiavarasto toimii siis tarvittavana säätöreservinä. Off-grid-järjestelmässä sähköä voidaan tuottaa aurinkopaneeleilla, tuulivoimalla, vesivoimalla, elektrolyysillä tai lisägeneraattorilla, kuten aggregaatilla. Suomessa off-grid-järjestelmiä käytetään usein mökeillä tai vapaa-ajan asunnoilla, joilla sähkön kulutus ei ole jatkuvaa ja sähköntarve on vähäinen. Lisäksi pienimuotoisia off-grid-järjestelmiä käytetään myös matkailuautoissa ja veneissä. Off-grid-järjestelmissä käytetään vaihtosuuntaukseen tarvittavan invertterin lisäksi säädintä akuston varaustason seuraamiseksi ja hallitsemiseksi. Säädin on joko invertterissä sisäänrakennettuna tai erillisenä komponenttina. Off-grid-invertterien tai generaattorien täytyy pystyä muodostamaan verkko itsenäisesti. Tähän tarkoitukseen olevat kaupalliset laitteet ovat yleisesti eri laitteita kuin on-grid-verkkoon kytkettävät laitteet, vaikka järjestelmä voitaisiinkin konfiguroida sopivaksi ohjelmistopäivityksellä. (Lehto 2017)

Off-grid-järjestelmää, jossa käytetään kahta tai useampaa eri tuotantojärjestelmää kutsutaan hybridijärjestelmäksi. Hybridijärjestelmiä käytetään aikaisemmin mainittujen käyttökohteiden lisäksi sääasemilla, vesipumpuissa tai katujen valaistuksissa (Misak 2010). IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) tietokanta sisältää useita tutkimuksia off-grid-

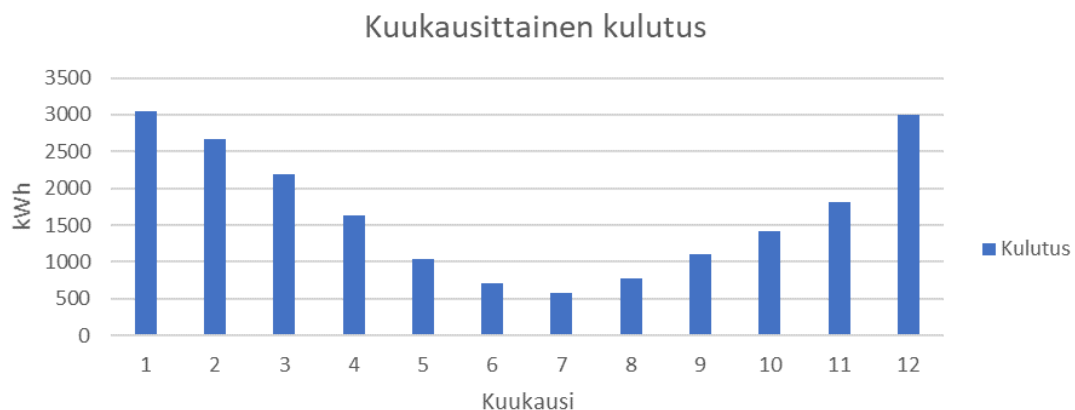
järjestelmistä, niiden mallinnuksesta ja simuloinnista eri käyttökohteissa. Suurin osa käsittelee kehitysmaiden sähköttömien kylien ja asutusten sähköistämistä hybridijärjestelmillä. Koska järjestelmien tarkoitus on tuottaa sähköä lähinnä valaistukseen ja ruuanlaittoon, tutkitut järjestelmät ovat usein hyvin pieniä, kooltaan muutaman kilowatin tehoisia tai pienempiä. Menconi et al. (2016) tutki off-grid-järjestelmän toimintaa maaseutu-asutuksen omavaraisessa sähköistyksessä Italiassa. Muita tutkimuksia, joissa tutkitaan asennettua off-grid-järjestelmää löytyy vähemmän, kuin off-grid-järjestelmän simuloinnin ja mallinnuksen tutkimuksia. Muiden käyttökohteiden tutkimuksia on esimerkiksi Prokop et al. (2017) tutkimus, jossa analysoitiin off-grid-järjestelmän ylläpitämää automaattisen pysäköintijärjestelmän toimintaa.

3. OMAKOTITALOJEN KULUTUS

Omakotitalojen sähkönkulutus vaihtelee eri lämmitysmuodosta, vuodenaajoista, talon koosta ja käyttäjästä riippuen. Tässä kappaleessa tarkastellaan kohdetalojen sähkönkulutusta ja sen vaihtelua eri aikoina.

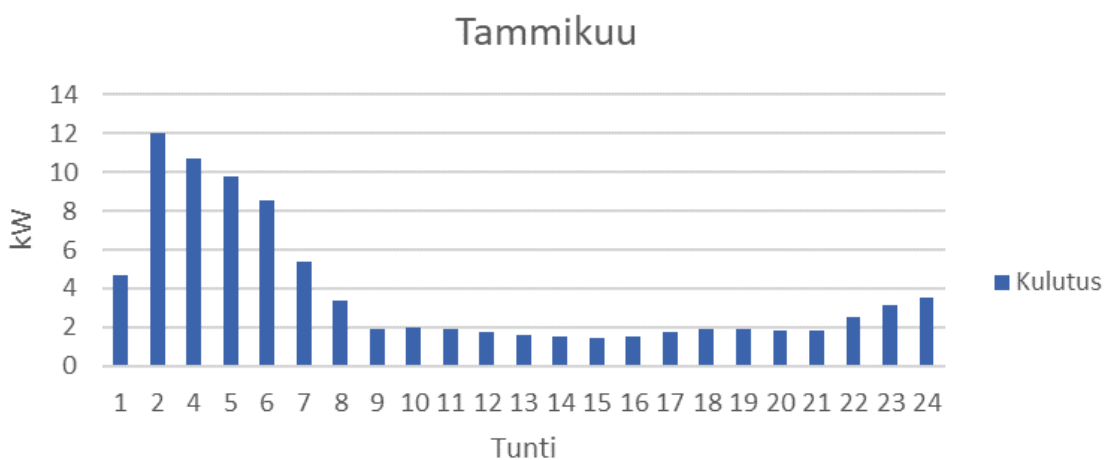
3.1 Sähkölämmitteinen omakotitalo

Ensimmäinen tutkimuksessa tarkasteltava kohde on sähkölämmitteinen, 20 MWh vuodessa kuluttava omakotitalo. Omakotitalon lämmitysteho on 12 kW ja siinä on käytössä osittain varaava sähkölämmitys. Talon kulutusmallina käytetään sähkölämmitteisen talon tyyppikulutusprofiilia L2 (Liite 1). Koska kyseessä on sähkölämmitteinen omakotitalo, suurin osa sähkönkulutuksesta on talon lämmittämiseen tarvittavaa sähköä. Tämän kohteen kuukausittaiset kulutukset on esitetty kuvassa 3.1.



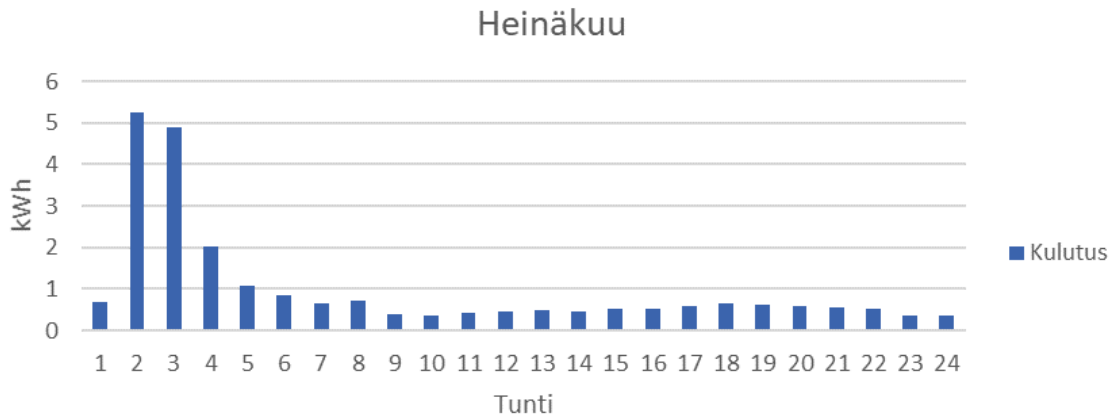
Kuva 3.1 Sähkölämmitteisen omakotitalon kuukausittainen sähkönkulutus.

Kuvasta 3.1 nähdään, että kulutus talvella tammi- ja joulukuussa on jopa yli kolminkertaista verrattuna kesä- ja heinäkuun kulutukseen. Vuoden alussa ja lopussa sää on kylmimmillään ja lämmitykseen kuluu eniten energiaa. Siirryttäessä kevääseen ympäristön lämpötila alkaa nousta ja talon lämmitykseen ei tarvita enää niin paljon energiaa. Talon sähkönkulutus laskee lähes lineaarisesti keväällä. Kesällä ympäristön lämpötila on korkeimmillaan ja lämmitykseen kuluu vuodenajoista vähiten energiaa. Myös talon kokonaissähkönkulutus on pienimmillään. Talvea kohti mennessä ympäristön lämpötila alkaa laskea ja lämmitykseen vaaditaan enemmän energiaa. Seuraavaksi tarkastellaan kohteen tuntikohtaisia kulutuksia. Kuvassa 3.2 on esitetty talon tuntikohtainen keskiarvoinen kulutus tammikuun ajalta.



Kuva 3.2 Sähkölämmitteisen omakotitalon tammikuun tuntikohtainen keskiarvokulutus.

Kuvasta 3.2 nähdään, että talon kulutus tammikuussa on yöllä huomattavasti suurempaa kuin päiväaikaan. Tämä johtuu tariffiohjauksesta, jossa talon kulutuspiikit on ohjattu yön ajalle, sillä yöllä ostettu sähkö on halvempaa kuin päivällä ostettu sähkö, johtuen yleisesti pienemmästä kulutuksesta sähköverkossa yöaikaan. Kulutuspiikit yöllä koostuvat lähinnä talon lämmityksestä, esimerkiksi lämminvesivaraajien lämmityksestä. Kuvassa 3.3 on esitetty keskiarvoinen tuntikohtainen sähkönkulutus heinäkuun ajalta.

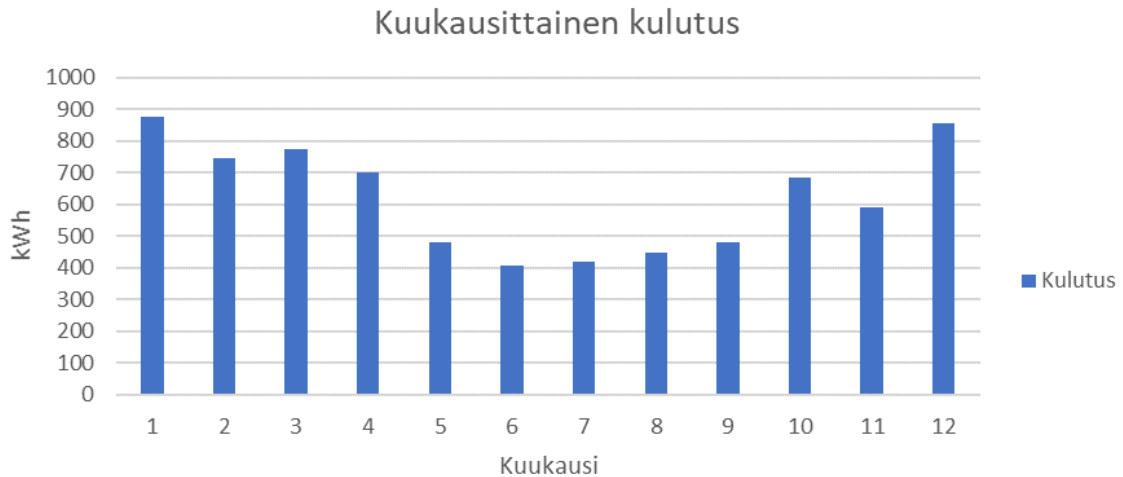


Kuva 3.3. Sähkölämmitteisin omakotitalon heinäkuun tuntikohtainen keskiarvokulutus.

Kuvasta 3.3 nähdään, että sähkönkulutus vaihtelee heinäkuussa lähes samoin kuin talvella. Samanlainen kulutuksen vaihtelu päivän tuntien välillä on huomattavissa vuoden jokaisena kuukautena. Kesällä tuntikohtainen sähkönkulutus on yli puolet pienempi talven kulutuksesta.

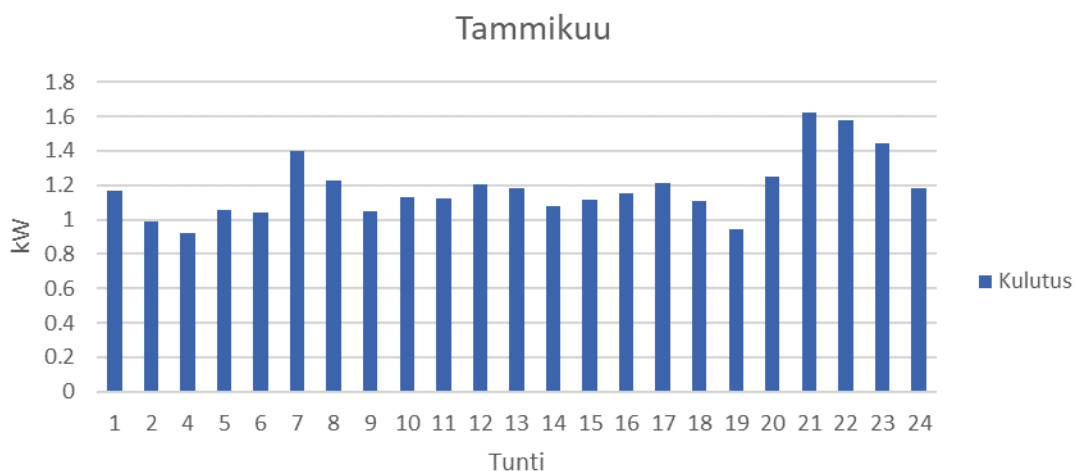
3.2 Nollaenergiahirsiotalo

Toinen tutkimuksen kohde on nollaenergiahirsiotalo, jossa lämmitykseen käytetään maalämpöä. Nollaenergiatalo on talo, joka tuottaa vuositasolla saman verran uusiutuvaa energiaa kuin mitä se kuluttaa. Nollaenergiatalossa tuotetaan sähköä yleensä aurinkopaneeleilla ja hyödynnetään esimerkiksi hukkalämmön talteenottoa jätevedestä tai savupiipusta (Nollaenergiatalo 2018). Nollaenergiahirsiotalo otettiin tarkasteluun mukaan, sillä se on nollaenergiaperiaatteella suunniteltu energiatehokas ja kehittynyt hirsiotalo. Nollaenergiahirsiotalossa hyödynnetään maalämmön lisäksi mm. aurinkoenergiaa, älykästä ohjausta ja energiatehokkaita kodinkoneita sekä valaistusta (Nollaenergiahirsiotalo 2019). Talon vuoden 2017 todellinen kulutus oli 7458 kWh. Kohteen tarkastelussa käytetään nollaenergiahirsiotalon vuoden 2017 kulutustietoja (Liite 2). Nollaenergiahirsiotalon kuukausittaiset sähkönkulutukset on esitetty kuvassa 3.4.



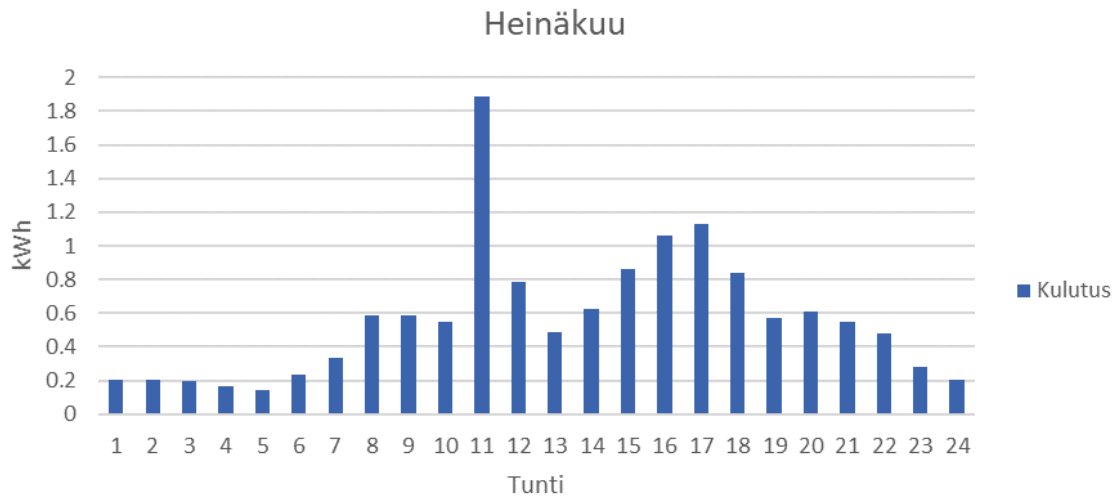
Kuva 3.4 Nollaenergiahirsitalon kuukausittainen sähkönkulutus.

Kuvasta 3.4 nähdään talon kuukausittaisen kulutuksen olevan korkeimmillaan tammikuussa lähes 900 kWh:ssa ja matalimmillaan kesäkuussa noin 400 kWh:ssa. Kuvasta myös nähdään, kuinka paljon pienempi maalämmöllä lämmitettävän nollaenergiatalon talven ja kesän kulutuksien ero on verrattuna sähkölämmitteiseen omakotitaloon. Tammi- ja joulukuun kulutukset sähkölämmitteisessä talossa ovat noin 30 % vuoden kokonaiskulutuksesta, kun vastaavasti nollaenergiahirsitalon tammi- ja joulukuun kulutukset ovat noin 23 %. Kulutusten vaihtelu eri kuukausina ei ole läheskään yhtä lineaarista kuin sähkölämmitteisen talon kulutusten vaihtelu, johtuen siitä, että sähkölämmitteisen omakotitalon kulutustiedot ovat tyyppikulutusprofiilista ja nollaenergiahirsitalon on yhden vuoden mitatusta kulutuksesta. Kuvassa 3.5 on esitetty nollaenergiahirsitalon tuntikohtainen keskiarvoinen kulutus tammikuun ajalta.



Kuva 3.5 Nollaenergiahirsitalon tammikuun tuntikohtainen keskiarvoinen kulutus.

Kuvasta 3.5 nähdään, että nollaenergiahirsiatalon kulutus muuttuu vähemmän eri päivän aikoina verrattuna sähkölämmitteisen talon kulutukseen. Ainoat kulutuspiikit ovat aamulla kello seitsemän ja illalla kello yhdeksän, jotka selittyvät asukkaiden heräämisellä ja iltatoimilla. Kuvassa 3.6 on esitetty nollaenergiahirsiatalon tuntikohtaiset keskiarvot kulutukset heinäkuun ajalta.



Kuva 3.6 Nollaenergiahirsiatalon heinäkuun tuntikohtainen keskiarvoinen kulutus.

Kuvasta 3.6 nähdään, että kesällä suurin kulutus on päivällä ja kulutus yleisesti päivän aikana on noin puolet talven kulutuksesta. Kohteena olevassa nollaenergiahirsiatalossa on asennettuna aurinkopaneeleja, mistä syystä kulutusta on ohjattu enemmän päivälle, jolloin aurinkopaneelien tuotanto kattaa mahdollisimman paljon kulutetusta sähköstä. Talvella tuotantoa on vähän tai ei ollenkaan, jolloin kulutus on tasaisempaa koko päivänä.

3.3 Tuotantomenetelmät

Tässä kappaleessa käsitellään käytettäviä sähkön tuotantomenetelmiä ja niiden investointikustannuksia. Kuten jo aikaisemmin on mainittu, off-grid-järjestelmissä voidaan käyttää energiantuotannossa aurinkovoimaa, tuulivoimaa, vesivoimaa, elektrolyysiä ja polttokennoa tai lisägeneraattoria. Lisägeneraattorina toimii yleensä dieselgeneraattori tai biokaasugeneraattori. (Misak 2010). Tässä työssä tuotantojärjestelminä käytetään aurinkovoimaa, tuulivoimaa ja vaihtoehtoisesti joko elektrolyysiä ja polttokennoa tai lisägeneraattoria. Lisäksi energiavarastona toimii akusto. Vesivoimaa ei tarkastella, sillä vesivoiman tuotanto on maantieteellisesti sidottua, eikä ole kaikkialla mahdollista. Mikäli vesivoiman tuotanto olisi mahdollista, antaisi se hyvän pohjan off-grid-järjestelmän sähköntuotannolle.

PV-järjestelmien eli aurinkosähköjärjestelmien LCOE- hinnat laskivat vuosien 2008–2014 aikana kansainvälisesti 48–64 % ja hinnat laskevat edelleen. LCOE eli levelized cost of energy on energiantuotantojärjestelmän koko eliniän kustannukset jaettuna energiantuotannolla. PV-järjestelmien hinnat vaihtelevat asennettavan järjestelmän koon mukaan ja riippuen onko kyseessä on-grid- vai off-grid-järjestelmä. Vuoden 2017 PV-järjestelmiä käsittelevässä Suomen maaraportissa todettiin 5–10 kW:n verkkoon kytketyn aurinkosähköjärjestelmän avaimet käteen hinnaksi 1.2–1.8 €/W (Ahola 2018). FinSolarin mukaan yli yhden kilowattipiikin PV-järjestelmän hinta on off-grid-järjestelmällä asennuksineen verottomana 3.5 €/Wp, kun vastaavasti alle 10 kW:n on-grid-järjestelmän hinta on 1.3–2 €/Wp (FinSolar 2017). Finlumon mukaan 5 kWp:n aurinkosähköjärjestelmä kustansi vuonna 2015 1.85 €/Wp, josta itse paneelien osuus oli 0.7 €/Wp. Loput hinnasta koostuu vaihtosuuntaajasta, telineistä ja muista tarvikkeista, veroista sekä asennuksesta (Finlumo 2016). On huomioitava, että Finlumon tapauksessa kyse on vuoden 2015 kustannuksista, ja todellisuudessa nykypäivänä kustannus on hinnan laskun vuoksi alhaisempi. Lumme Energian hinta 2.2 kWp:n PV-järjestelmälle on asennuksineen ja veroineen 2.6 €/Wp ja 7.7 kWp:n PV-järjestelmälle 1.5 €/Wp (Lumme Energia 2019).

Teollisen aurinkovoimalaitoksen investointikustannus vuoden 2017 maaraportin mukaan on 0.85–1.15 €/W (Ahola 2018). Vuoden 2017 sähkön tuotantokustannusvertailussa aurinkovoimalaitoksen ominaisinvestointikustannukseksi todettiin 1.08 €/Wp ja teollisen tuulivoimalaitoksen 1.36 €/W (Vakkilainen 2017). Teollisten voimalaitosten kustannukset eivät kuitenkaan ole verrattavissa yksityisiin investointeihin, mutta antavat näkökulmaa hintavertailuun. Pientuulivoimaksi luetaan alle 50 kW:n tuulivoimalat (Tuulivoimayhdistys 2019). Pientuulivoimaloita ei ole markkinoilla saatavilla yhtä helposti kuin PV- järjestelmiä. 2 kW:n nimellistehoisen Istabreeze Windsafe pientuulivoimalan hinnaksi Saaristotekniikan verkkosivuilla tulee 0.75 €/W, mutta hintaan ei kuulu masto, johdot eikä lataussäädin (Saaristotekniikka 2019). Finnwind tarjoaa 3 kW:n nimellistehoisen pientuulivoimalan 12 metrin mastolla hintaan 5.6 €/W (Finnwind 2019).

Yksi halvimmista markkinoilla olevista akuista on Teslan Powerwall- akku, jonka käyttökelpoinen kapasiteetti on 13.5 kWh, huipputeho 7 kW ja jatkuvan syötön maksimiteho 5 kW. Akkujärjestelmän hinnaksi tulee noin 0.5 €/Wh ja jatkuvan tehon avulla laskettuna

akusta saatavan tehon investointikustannukseksi tulee 1.4 €/W (Tesla 2019). Elektrolyysijärjestelmien hinnat ovat huomattavasti korkeampia, noin 5 kW:n järjestelmän hinta on mallista riippuen 3.3–20 €/W (Koponen 2015).

Diesel- generaattorit ovat investointikustannukseltaan halpoja suhteessa edellä mainittuihin investointikustannuksiin, mutta diesel- generaattoreiden käyttöön kuuluvat polttoainekustannukset, joita aurinko- ja tuulivoimaloilla ei ole. Kärkkäinen.com myy 5.5 kVA:n Kipor KDE6500E3 diesel- aggregaattia hintaan 1090 €, jolloin investointikustannukseksi tulee 0.2 €/VA. Aggregaatin polttoainesäiliön tilavuus on 13.5 litraa ja aggregaatin käyntiaika maksimikuormalla on 6 tuntia (Kärkkäinen 2018). Dieselin keskihinta vuonna 2018 oli 1.4 €/litra (Tilastokeskus 2019). Maksimikuormalla käytettynä aggregaatin polttoainekustannuksiksi saadaan 0.6 €/kWh, jos oletetaan kuorman olevan täysin pätötehoa.

4. SIMULAATIOT JA MITOITUS

Tässä kappaleessa käsitellään tuotannon simulointia ja järjestelmien mitoitusta. Ensin käsitellään simulointiprosessi, jonka jälkeen käsitellään Excel-pohjaista mitoitustyökalua ja itse mitoitusta.

4.1 Oletukset ja rajaukset

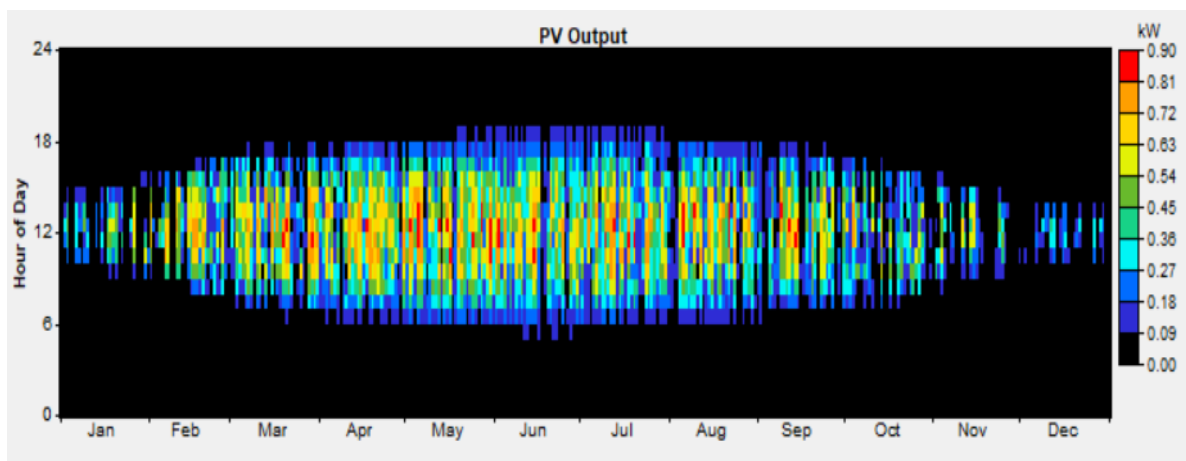
Tässä työssä ei ole tarkasteltu tuntikohtaista akun käyttäytymistä, vaan akun käyttö on rajattu päivätasolle. Akkuja tarkastellaan päiväkohtaisesti, tarkoittaen ettei akuista siirretä energiaa seuraavalle päivälle, vaan akuista tiettyinä päivinä käyttöön saatava energia riippuu kyseisen päivän tuotannosta ja kulutuksesta. Tuotantojärjestelmät mitoitetaan energiatasolla, eikä sähkösuunnitelmiin tai asennuspaikkoihin paneuduta. Markkinoilla olevien veden elektrolyysijärjestelmien HHV- hyötysuhde eli korkeamman lämpöarvon hyötysuhde on alle 80 %. Työssä elektrolyysin hyötysuhteeksi valittiin 70 %. Vedyn energiatiheyden arvona on käytetty 39.4 kWh/kg (Koponen 2015). Kausivarastoa tarkastellaan kuukausikohtaisesti ja tarkasteltavan kuukauden ylituotanto on oletettu saatavan käyttöön kausivaraston avulla kyseisenä kuukautena. Polttokennolla poltetusta vedystä oletetaan saatavan kaikki energia hyötykäyttöön, puolet sähkönä ja puolet lämpöenergiana, joka oletetaan hyödynnettävän kohteen lämmityksessä. Todellisuudessa maalämpöalossa näin ei tapahdu.

4.2 Tuotannon simulointi

Aurinko- ja tuulivoiman tuotantodata simuloitiin käyttäen Homer Energy-ohjelmistoa. Tuotanto simuloitiin 1 kW:n suuruisille järjestelmille, jonka jälkeen tuotantoa voitiin skaalata mitoitustyökälulla haluttuun suuruuteen. Simulointia varten kohteet sijoitettiin noin 10 kilometriä Mikkelin keskustasta koilliseen.

4.2.1 Aurinkovoiman simulointi

Aurinkovoiman simuloinnissa Homer Energy-ohjelmistolla luotiin verkkoon kytketty järjestelmä, johon kuului 1 kW:n aurinkovoimala ja 1 kW:n vaihtosuuntaaja. Aurinkopaneelien kulmaksi valittiin 35 astetta ja suuntaukseksi nolla astetta, jolloin aurinkopaneelit on suunnattu etelää kohti. Hiekan, lian ja sääolosuhteiden aiheuttamaksi tuotantoa alentavaksi kertoimeksi valittiin 20 %. Ohjelman mukaan lumisilla alueilla kerroin voi olla jopa 70 %, mutta koska sen vaikutus simuloinnissa on vähäinen, arvoa ei muutettu ohjelman antamasta vakioarvosta. Lämpötilan vaikutuksen kertoimeksi valittiin $-0.5 \text{ \%}/^{\circ}\text{C}$ ja ominaistoimintalämpötilaksi $47 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Lämpötilan vaikutuksen kerroin kuvaa tehon laskua paneelien lämpötilan noustessa ja ominaistoimintalämpötila on paneelien kennojen lämpötila, kun ympäristön lämpötila on $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tuulen nopeus on 1 m/s ja auringon säteilyteho on 800 W/m^2 . Normaalien testiolosuhteiden hyötysuhteeksi valittiin 17 %. Vaihtosuuntaajan hyötysuhteeksi valittiin ohjelmiston oletusarvo 90 %. Auringon säteilyn tehot ja selkeys kertoimet ladattiin NASA:n tietokannoista. Latausta varten asetettiin sijainniksi $61^{\circ} 45' \text{ N } 27^{\circ} 26' \text{ E}$. Kuukausikohtaisina keskiarvolämpötiloina käytettiin ilmatieteenlaitoksen vuoden 2017 kuukausikeskiarvoja Mikkelissä. Kuvassa 4.1 on esitetty aurinkosähkön tuotanto kuukausien ja vuorokauden ajan suhteen.



Kuva 4.1 1 kW:n aurinkovoimalan simuloitu aurinkosähkön tuotanto vuoden eri aikoina.

Kuvasta 4.1 nähdään, että aurinkosähkön tuotanto on suurimmillaan kesällä keskipäivän aikaan. Talvella tuotantoa on vähemmän, mutta todellisuudessa lumen takia tuotanto voi olla talven aikaan lähes olematonta. Koko vuoden sähkön tuotannoksi simulaatiolla saatiin 1.05 MWh. Asentamalla osan paneeleista suunnattuna enemmän itään tai länteen, saadaan sähkön tuotantoa pidemmällä ajanjaksolla päivän aikana. Asennuskulmaa kasvattamalla saadaan enemmän tuotantoa talvella, mutta vähemmän kesällä (Lehto 2017).

4.2.2 Tuulivoiman simulointi

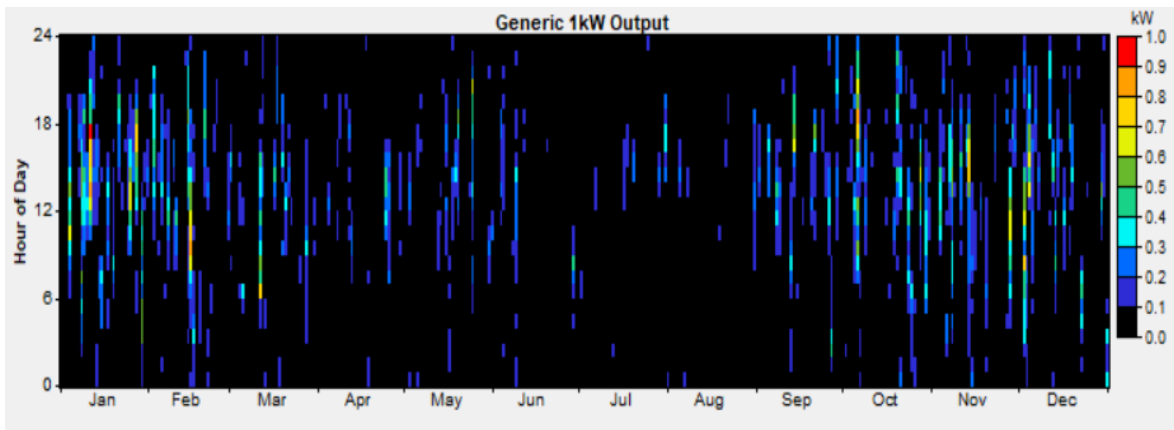
Tuulivoiman simuloinnissa luotiin samanlainen järjestelmä kuin aurinkovoimankin, mutta aurinkopaneelit korvattiin 1 kW:n tuulivoimalalla. Tuulivoimalan mallina käytettiin Homer Energyn omaa yleistettyä tuulivoimalaa. Koska kyseessä on omakotitaloon yksityiskäyttöön tuleva tuulivoimala, tornin korkeudeksi valittiin 25 metriä. Saimaan vedenpinnan korkeus merenpinnasta on noin 76 metriä, joten valittiin korkeudeksi merenpinnasta 100 metriä. (Ympäristöhallinto 2018). Tuulen kuukausittaiset keskinopeudet katsottiin 50 metrin korkeudelta Tuuliatlaksen käyttöliittymällä aiemmin valitusta sijainnista ja ne on esitetty taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Tuulen nopeuden keskiarvot 50 metrin korkeudella eri kuukausina (Tuuliatlas 2018).

Kuukausi	Tuulen nopeus
	m/s
Tammikuu	5.5
Helmikuu	5.1
Maaliskuu	4.6
Huhtikuu	4.2
Toukokuu	4.5
Kesäkuu	4.1
Heinäkuu	3.9
Elokuu	3.8
Syyskuu	4.7
Lokakuu	5.1
Marraskuu	5.1
Joulukuu	5.1
Keskiarvo	4.64

Taulukosta 4.1. havaitaan, että tuulen nopeus on voimakkaampaa talvisin kuin kesäisin. Korkeuden vaihtelun malliksi simulaatiossa valittiin logaritminen malli ja ympäristön karkeuden arvoksi valittiin 0.15, joka on ohjelman mukaan harvan puuston ja runsaan puuston välillä.

Weibull k-kertoimeksi, eli kertoimen, joka kuvaa tuulen vuosittaisen jakauman leveyttä, arvoksi valittiin 2.5. Edellisen tunnin tuulen nopeuden vaikutusta seuraavan tunnin tuulen nopeuteen kuvaavan autokorrelaatiokertoimen arvoksi valittiin 0.9. Päivittäisen tuulijakauman kertoimeksi valittiin 0.2 ja päivän tuulisimmaksi ajankohdaksi kello 15. Tuulivoimalan sähkön tuotanto on kuvattu kuukausien ja vuorokauden ajan suhteen kuvassa 4.2.



Kuva 4.2 1 kW:n tuulivoimalan simuloitu sähköntuotanto vuoden eri aikoina.

Kuvasta 4.2 nähdään, että simuloitu tuulivoiman sähkön tuotanto on suurimmillaan päiväsaikaan kuten aurinkosähkönkin. Tuulivoiman tuotanto on kuitenkin painottunut talven ajalle ja tuotanto on hajaantunut paljon voimakkaammin päivän eri ajoille kuin aurinkosähkön tuotanto. Koko vuoden sähkön tuotannoksi simulaatiolla saatiin 422 kWh, mikä on alle puolet vastaavan kokoisen aurinkojärjestelmän tuotannosta. Tuulivoimalan sähkön tuotantoa voitaisiin kasvattaa kasvattamalla tuulivoimalan tornin korkeutta tai valitsemalla voimalatyyppi, joka tuottaa paremmin sähköä alhaisemmilla tuulenopeuksilla. Valitulla yleistetyllä mallilla tuotanto alkaa tuulen nopeuden ollessa 4 m/s ja saavuttaa huippunsa tuulen nopeuden ollessa 14 m/s.

4.3 Mitoitustyökalu

Mitoitus aloitettiin tuntikohtaisella tarkastelulla. Tuotantoa kulutukseen vertaamalla saatiin laskettua tuntikohtaisesti omaan käyttöön suoraan saatava sähkö, ylituotanto ja lisäenergian tarve. Tuntikohtaisesta datasta voitiin laskea tämän jälkeen päiväkohtaisesti omaan käyttöön saatava sähkö, ylituotanto ja lisäenergian tarve. Päiväkohtaisella tasolla lisättiin työkaluun akku, jonka kokoa pystyttiin skaalaamaan. Laskettiin akun tarve päivätasolla vertaamalla

ylituotantoa ja lisäenergian tarvetta. Päiväkohtainen akun tarve määritettiin näistä pienemmän suuruiseksi, kuten kuvassa 4.3 on esitetty. Ylituotanto on merkitty negatiiviseksi kuvaajien selkeyttämiseksi.

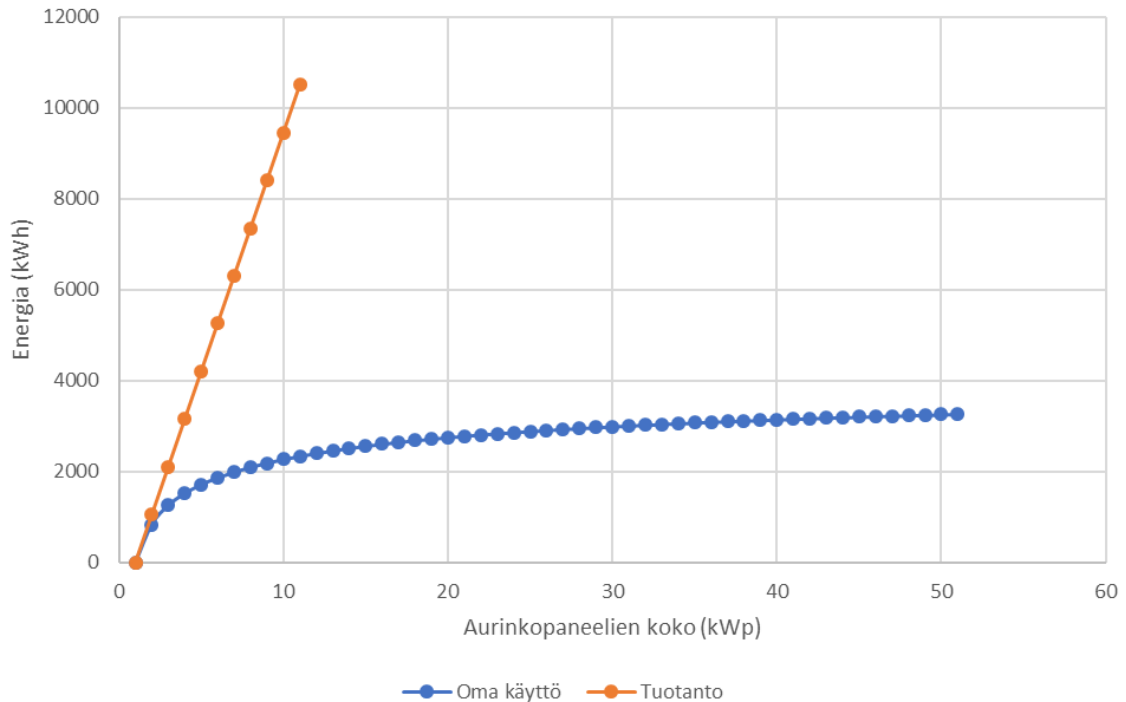
PVM	Kuukausi	Päivä	Kulutus	Tuotanto	Ylituotanto	Oma Käyttö	Lisäenergian tarve	Akun Tarve
pp.kk.vvvv			kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
1.1.2017	1	1	26.722	0.889	0	0.889	25.833	0
2.1.2017	1	2	24.219	8.561	-2.934	5.627	18.592	2.934
3.1.2017	1	3	32.53	18.487	-7.663	10.824	21.706	7.663
4.1.2017	1	4	39.774	34.286	-11.634	22.652	17.122	11.634
5.1.2017	1	5	35.469	2.24	0	2.24	33.229	0
6.1.2017	1	6	42.43	10.241	-2.175	8.066	34.364	2.175
7.1.2017	1	7	38.701	15.344	-0.446	14.898	23.803	0.446
8.1.2017	1	8	35.554	46.312	-21.486	24.826	10.728	10.728
9.1.2017	1	9	29.182	35.399	-19.86	15.539	13.643	13.643
10.1.2017	1	10	28.242	18.963	-8.993	9.97	18.272	8.993
11.1.2017	1	11	24.537	50.925	-36.683	14.242	10.295	10.295
12.1.2017	1	12	26.833	17.871	-4.506	13.365	13.468	4.506
13.1.2017	1	13	22.232	20.741	-8.269	12.472	9.76	8.269
14.1.2017	1	14	27.898	14.217	-2.928	11.289	16.609	2.928
15.1.2017	1	15	27.784	22.967	-7.49	15.477	12.307	7.49
16.1.2017	1	16	22.074	4.207	-0.04	4.167	17.907	0.04
17.1.2017	1	17	27.168	29.841	-17.628	12.213	14.955	14.955
18.1.2017	1	18	25.631	18.396	-10.415	7.981	17.65	10.415
19.1.2017	1	19	24.102	28.203	-16.686	11.517	12.585	12.585
20.1.2017	1	20	25.866	19.635	-12.427	7.208	18.658	12.427
21.1.2017	1	21	25.782	22.449	-6.567	15.882	9.9	6.567
22.1.2017	1	22	27.089	16.128	-7.27	8.858	18.231	7.27

Kuva 4.3 Havainnekuva mitoitusyökalulla tehdystä akun tarpeen laskennasta.

Akun lisäämisen jälkeen voitiin laskea päiväkohtainen akullinen ylituotanto, akulla käyttöön saatava energia ja lisäenergian tarve. Seuraavaksi laskettiin kuukausikohtaisesti akulla ja ilman akkia tuotannosta omaan käyttöön saatava energia, ylituotanto ja lisäenergian tarve. Kuukausitasolla lisättiin työkaluun kausivarasto. Valittiin kausivarastoksi vetytankki, johon ylituotannon aikaan tuotetaan elektrolyysillä vetyä ja lisäenergian tarpeen aikaan polttokennolla käytetään tuotettua vetyä sähkön ja lämmön tuotantoon. Kausivarasto voidaan korvata myös generaattorilla, joka tuottaa tarvittavan lisäenergian. Kuukausitasosta voitiin laskea vuotuinen tuotannosta suoraan omaan käyttöön saatava energia, akulla käyttöön saatava energia, ylituotanto ja lisäenergian tarve.

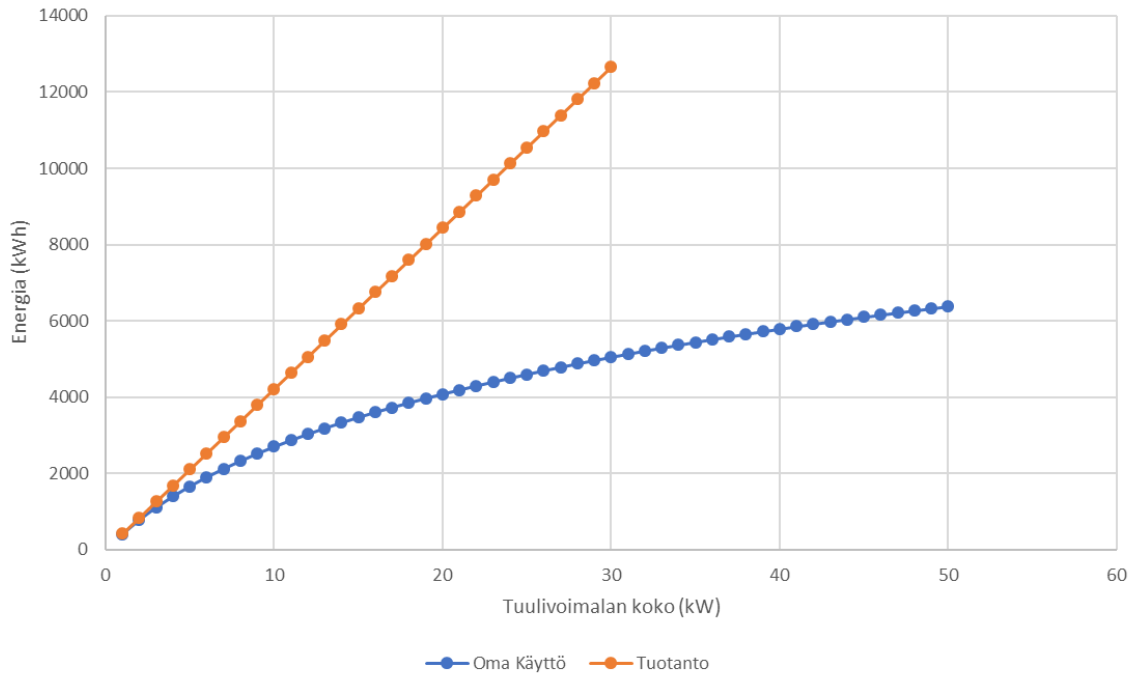
4.4 Järjestelmän mitoitus sähkölämmitteiselle omakotitalolle

Järjestelmän mitoitus aloitettiin tarkastelemalla vuositasolla tuotannosta suoraan omaan käyttöön saatavaa energiaa. Kuvassa 4.4 on esitetty aurinkovoimalan vuotuinen tuotanto ja siitä suoraan omaan käyttöön saatava energia.



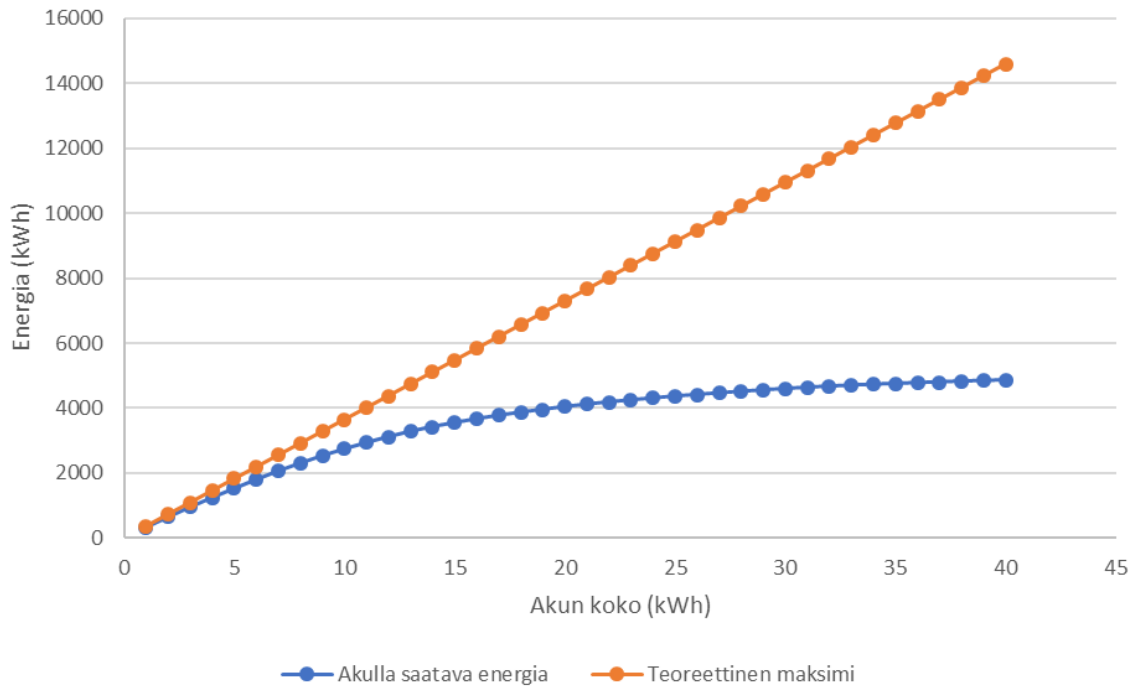
Kuva 4.4 Aurinkovoimalan vuotuinen tuotanto ja suoraan omaan käyttöön saatava energia aurinkovoimalan koon suhteen sähkölämmitteisellä omakotitalolla.

Kuvasta 4.4 nähdään, että aurinkovoimalan tuotannosta suoraan omaan käyttöön saatava energia kasvaa vain vähän aurinkovoimalan kokoa kasvatettaessa, korostuen mitä suuremmaksi aurinkovoimalaa kasvatetaan. Kuvassa tuotannon ja oman käytön välinen pinta-ala on vuotuinen ylituotanto ja jo 3 kW:n aurinkovoimalalla ylituotantoa tulee vuodessa 1630 kWh, enemmän kuin suoraan omaan käyttöön saatava 1520 kWh. Vastaavasti 10 kW:n aurinkovoimala tuottaa vuodessa 10 510 kWh, josta omaan käyttöön saadaan vain 2340 kWh ja ylituotantoa tulee noin 8170 kWh. Suoraan omaan käyttöön saadaan pieni osa kokonaistuotannosta, koska kohteen kulutuksen ollessa suurimmillaan talvella ja öisin, aurinkopaneelien tuotanto on suurimmillaan kesäisin ja ajoittuu päiväsaikaan. Kuvassa 4.5 on esitetty tuuli-voimalan vuotuinen tuotanto ja siitä suoraan omaan käyttöön saatava vuotuinen energia.



Kuva 4.5 Tuulivoimalan vuotuinen tuotanto ja suoraan omaan käyttöön saatava energia tuulivoimalan koon suhteen sähkölämmitteisellä omakotitalolla.

Tuulivoimalan kokoa kasvatettaessa suoraan omaan käyttöön saatava vuotuinen energia kasvaa enemmän kuin aurinkovoimalalla. Tämä johtuu siitä, että tuulivoimalan tuotanto on jakautunut tasaisemmin päivän eri aikoihin ja siitä, että tuulivoimala tuottaa vähemmän energiaa asennettua kilowattia kohden kuin aurinkovoimala. Tuulivoimalalla ylituotanto ylittää suoraan omaan käyttöön saatavan energian voimalan koon ollessa 19 kW. Tällöin tuotantoa on 8020 kWh, josta suoraan omaan käyttöön saadaan 3970 kWh. Kuvassa 4.6 on esitetty akustolla tuotannosta käyttöön saatava vuotuinen energia akuston koon suhteen. Aurinkovoimalan ja tuulivoimalan kooksi valittiin edellä mainitut koot, joilla ylituotanto kasvaa suuremmaksi kuin omaan käyttöön saatava energia.

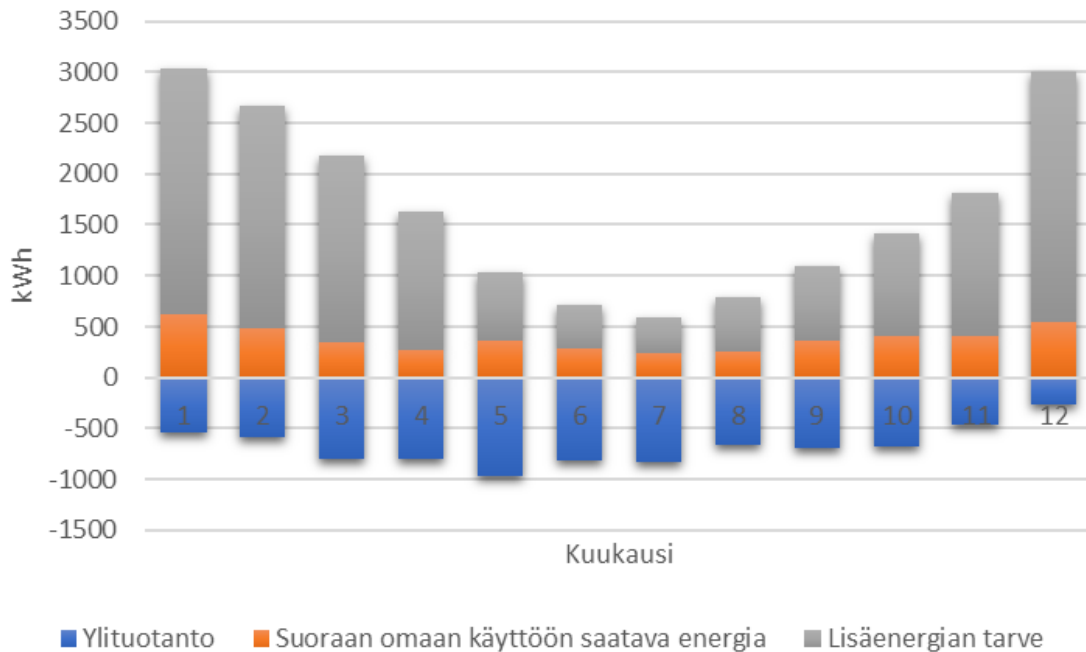


Kuva 4.6 Akustolla tuotannosta käyttöön saatava vuotuinen energia akuston koon suhteen sähkölämmitteisellä omakotitalolla, kun aurinkovoimalan koko on 3 kW ja tuulivoimalan 19 kW.

Myös akustolla käyttöön saatava vuotuinen energia kasvaa samalla lailla kuin aurinko- ja tuulivoimalasta käyttöön saatava vuotuinen energia. Teoreettinen maksimi on laskettu olettamalla yhtenä päivänä akusta käyttöön saatava energia yhtä suureksi kuin akun koko ja kertomalla tätä 365:llä päivällä. Teoreettisesta maksimista puolet saadaan käyttöön akun koon ollessa 23 kWh.

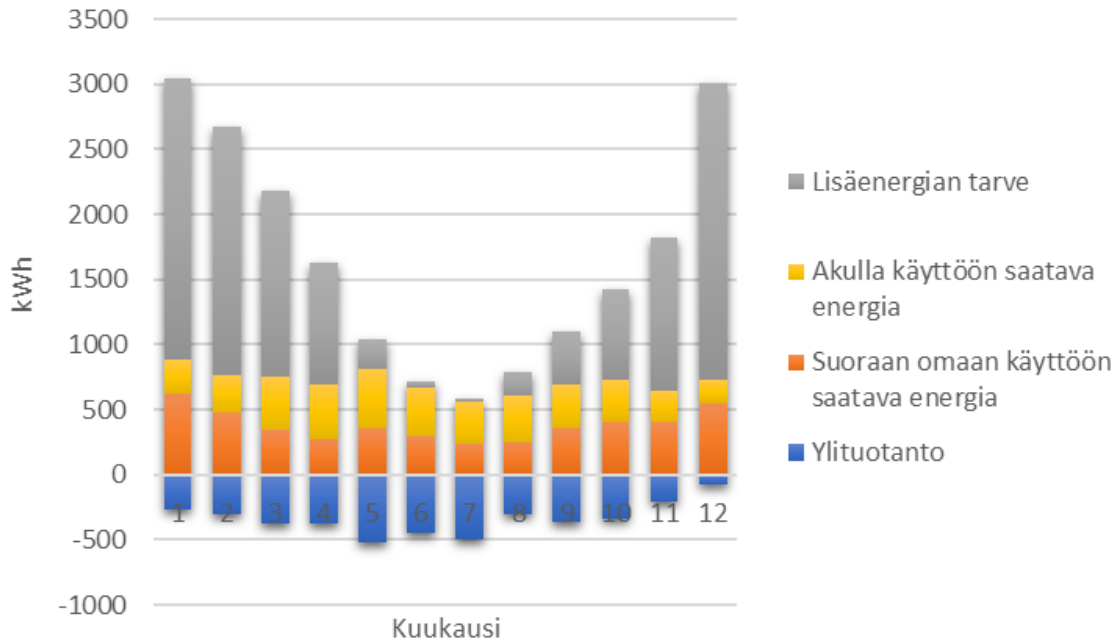
Seuraavaksi tuotantojärjestelmän mitoitusta jatkettiin skaalaamalla aurinko- ja tuulivoimalan koot edellä mainittuihin arvoihin, joissa vuotuinen ylituotanto ylittää suoraan omaan käyttöön saatavan energian. Tämän jälkeen tuotantoa skaalattiin suuremmaksi niin, että vuotuisen tuotannon määrä ylittää vuotuisen kulutuksen samalla pyrkien pitämään ylituotanto mahdollisimman vähäisenä. Tämän jälkeen mitoitustyökalulla laskettiin akun koon tarve eri päivinä ja valittiin akun kooksi arvo, jolla akku riittää ylläpitämään järjestelmää noin 70 % vuoden päivistä. Tämän jälkeen tuotantojärjestelmiä kasvatettiin niin, että kesän aikana kausivarastoon saatava energia on suurempi kuin talven aikana kausivaraston energian tarve, elektrolyysin hyötysuhde huomioon ottaen. Järjestelmän kooksi saatiin 12 kWp:n aurinkovoimala, 30 kW:n tuulivoimala ja 30 kWh:n akusto. Vertailukohteen saamiseksi tuotanto-

järjestelmä puolitettiin. Kuvassa 4.7 on esitetty puolitetun akuttoman järjestelmän kuukausittainen energiaprofiili, jossa kuukausittainen positiivinen osa on kuukausittainen kulutus jaettuna suoraan omaan käyttöön saatavaan energiaan ja lisäenergian tarpeeseen ja oma käyttö ja ylituotanto kuvaavat kuukausittaista tuotantoa. Ylituotanto on merkitty kuvaajaan negatiivisena, koska sitä ei saada käyttöön.



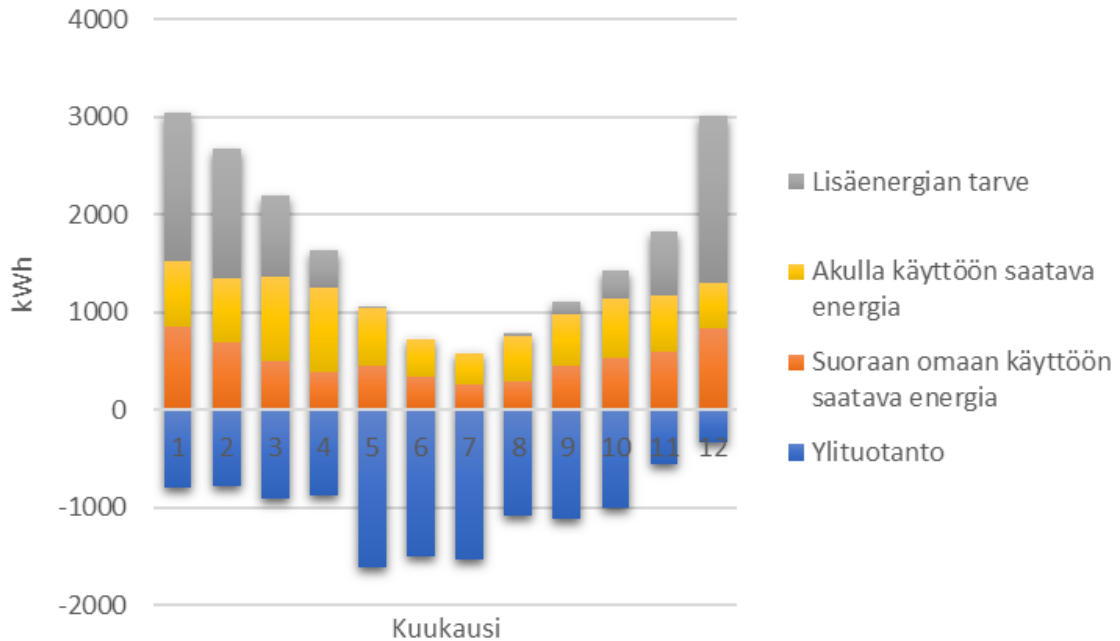
Kuva 4.7 Sähkölämmitteisen omakotitalon kuukausittainen energiajakauma, kun aurinkovoimalan koko on 6 kW ja tuulivoimalan 15 kW.

Puolitetulla akuttomalla järjestelmällä tuotanto on suurempaa kuin kulutus vain toukokuusta elokuuhun. Suurin osa tuotannosta on kuitenkin tällä aikavälillä ylituotantoa eikä käyttöön saatava energia kata edes puolta kulutuksesta. Tammi- ja joulukuussa suoraan omaan käyttöön saatavan energian määrä on suurempi kuin ylituotannon. Tämä selittyy aurinko- ja tuulivoiman tuotantoprofiilien suhteesta kulutusprofiiliin. Talven suuremmasta tuulivoimalan tuotannosta saadaan enemmän energiaa suoraan omaan käyttöön kuin kesällä päiväaikaan sijoittuneesta suuremmasta aurinkosähkön tuotannosta. Kyseisellä järjestelmällä vuotuinen energiantuotanto on 12 640 kWh, josta suoraan omaan käyttöön saadaan 4570 kWh ja ylituotantoa tulee 8070 kWh. Lisäenergian tarpeeksi jää siis 15430 kWh. Kuvassa 4.8 on esitetty puolitetun järjestelmän energiaprofiili, kun siihen on lisätty 15 kWh:n akusto.



Kuva 4.8 Sähkölämmitteisen omakotitalon kuukausittainen energijakauma, kun järjestelmään on lisätty 15 kWh:n akusto.

Kun lisätään akusto järjestelmään, tuotannosta ei vielä täysin saada tarpeeksi energiaa käyttöön touko- ja elokuun välillä kulutukseen vastaamiseksi, vaikka energiaa tuotetaan enemmän kuin kulutetaan. Tuotanto ja suoraan omaan käyttöön saatava energia pysyvät samana. Akulla käyttöön saadaan 3990 kWh, jolloin ylituotannon määrä puolittuu 4090 kWh:iin. Lisäenergian tarpeeksi jää 11 450 kWh. Kausivarastoa tarkasteltaessa lokakuun loppuun mennessä on varastoitu 760 kWh energiaa, joka vastaa 19 kilogrammaa vetyä. Talvesta selviytymiseen kausivaraston avulla varastoituna tulisi olla vähintään 9340 kWh energiaa, joka vastaa 237 kilogrammaa vetyä. Kausivarasto tässä tapauksessa on siis melko hyödytön, mutta ei 11 MWh:n tuotanto lisägeneraattorillakaan ole kovin järkevää. Kuvassa 4.9 on esitetty sähkölämmitteisen omakotitalon energiaprofiili, kun edellä tarkastellun järjestelmän koko kaksinkertaistetaan.



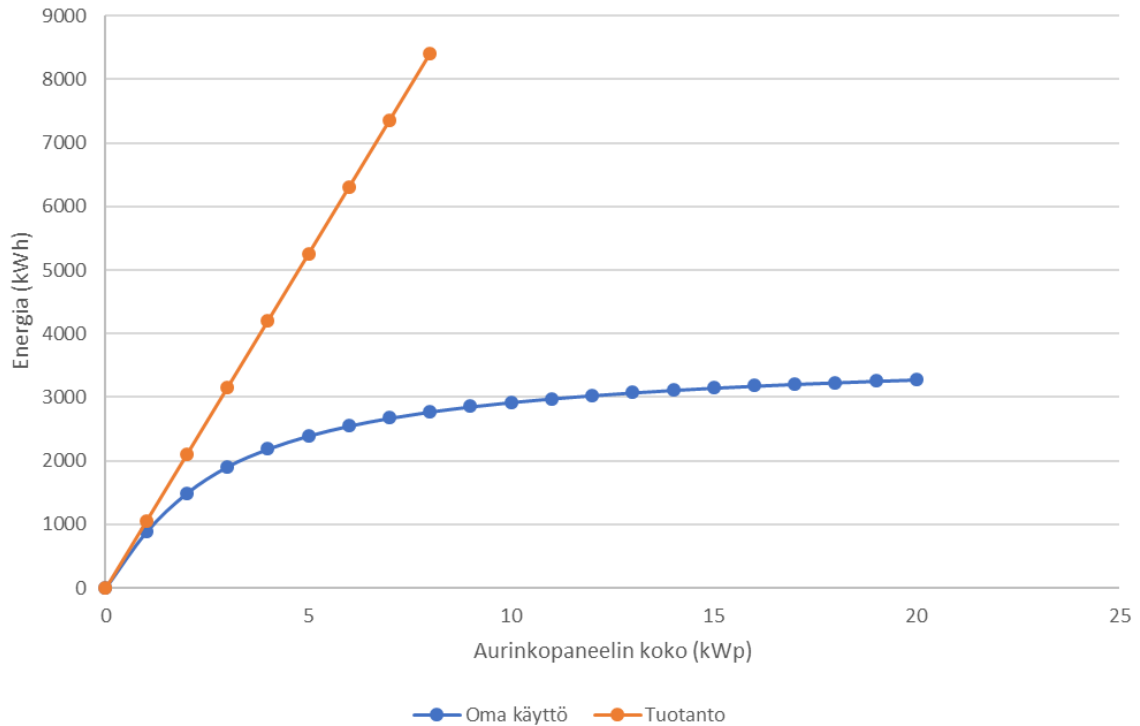
Kuva 4.9 Sähkölämmitteisen omakotitalon kuukausittainen energijakauma, kun järjestelmä koostuu 12 kW aurinkovoimalasta, 30 kW tuulivoimalasta ja 30 kWh akustosta.

Järjestelmän kokoa kaksinkertaistettaessa tuotanto kaksinkertaistuu 25 280 kWh:iin, suoraan omaan käyttöön saatavan energian määrä kasvaa noin puolella 6150 kWh:iin ja akulla käyttöön saatava energia kasvaa 75 % nousten 7000 kWh:iin. Kun tuotantojärjestelmän kokoa kasvatetaan akun koon kasvattamisen yhteydessä, akustolla saadaan huomattavasti enemmän energiaa käyttöön kuin kuvan 4.6 mukaisesti vain akuston kokoa kasvattamalla. Akulla käyttöön saatavan energian määrä on myös tasaisempaa eri kuukausien välillä suuremmalla järjestelmällä, joskin kesällä kulutuksen vähäisyys rajoittaa akulla käyttöön saatavaa energiaa. Ylituotannon määrä lähes kolminkertaistuu kasvaen 12 130 kWh:iin ja lisäenergian tarve lähes puolittuu 6850 kWh:iin. Kausivarastoa tarkasteltaessa varastoidun energian tarve talvelle on 3660 kWh, joka vastaa 93 kg vetyä, kun lokakuun loppuun mennessä on kesän aikana varastoitu 5300 kWh, joka vastaa 135 kg vetyä. Kausivarastolla pärjättäisiin talven yli hyvin, ja varaa jää kulutuksen kasvulle tai huonommalle tuotannollekin hieman vajaan 2000 kWh:n verran.

4.5 Järjestelmän mitoitus nollaenergiatalolle

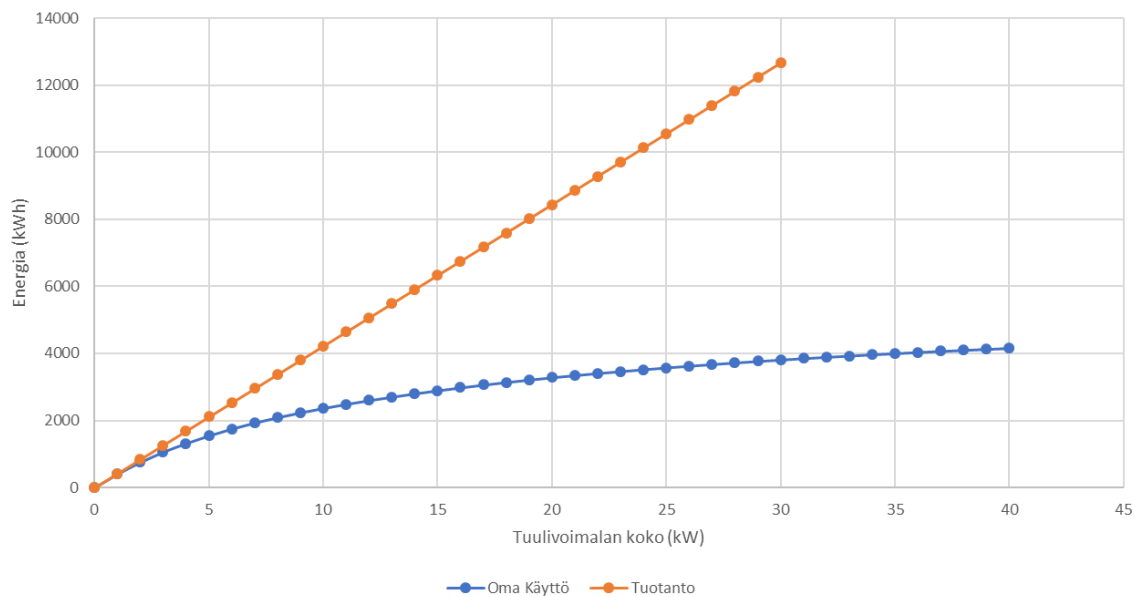
Myös nollaenergiatalon mitoitus aloitettiin tarkastelemalla tuotannosta suoraan omaan käyttöön saatavaa vuotuista energiaa. Kuvassa 4.10 on esitetty aurinkovoimalan vuotuinen

tuotanto ja suoraan omaan käyttöön saatava energia aurinkovoimalan koon suhteen, kun kohteena on tarkasteltava nollaenergiatila.



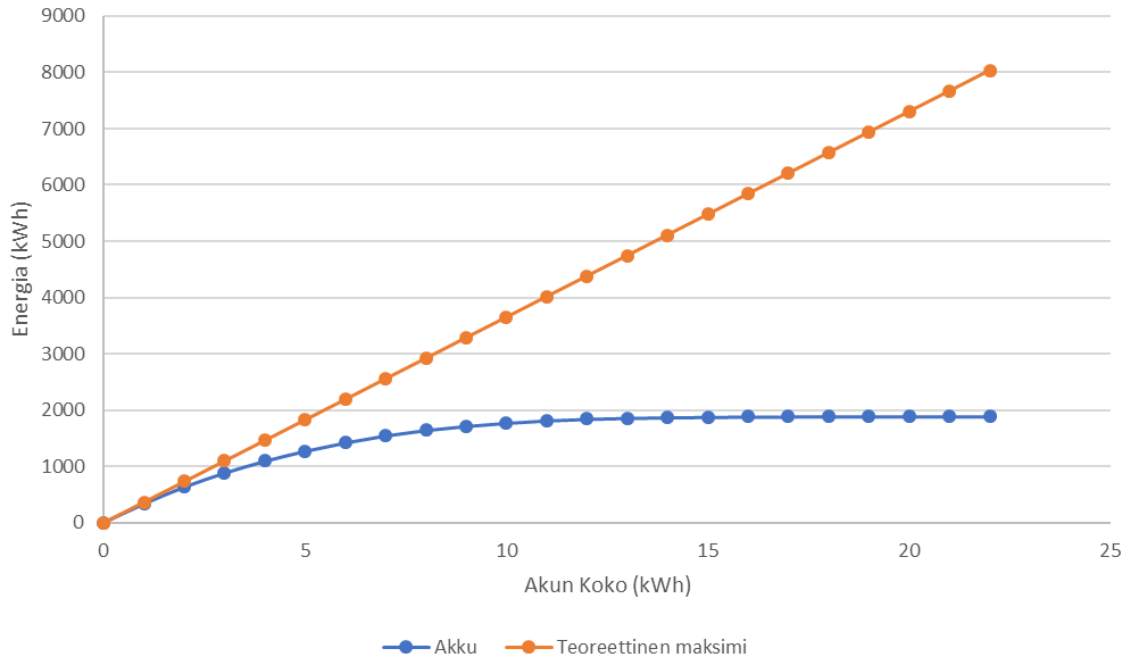
Kuva 4.10 Aurinkovoimalan vuotuinen tuotanto ja suoraan omaan käyttöön saatava energia aurinkovoimalan koon suhteen nollaenergiatilalla.

Nollaenergiatilalla aurinkovoimalan tuotannosta suoraan omaan käyttöön saatava energia kasvaa nopeammin aurinkovoimalan kokoa kasvattaessa, kuin sähkölämmitteisellä omakotitalolla. 20 kW:n järjestelmällä saadaan suoraan omaan käyttöön vuodessa 3278 kWh kun sähkölämmitteisessä omakotitalossa 50 kW:n järjestelmällä saadaan 3266 kWh. Nollaenergiatilalla ylituotanto ylittää suoraan omaan käyttöön saatavan energian, kun aurinkovoimalan koko on 5 kW. Tällöin ylituotantoa tulee vuodessa 2860 kWh ja suoraan omaan käyttöön saadaan 2390 kWh. 10 kW aurinkovoimalalla ylituotantoa tulee vuodessa 7590 kWh ja omaan käyttöön saadaan 2920 kWh. Koska nollaenergiatilalla on ohjattu kulutusta päiväsaikalle, saadaan aurinkovoimalan tuotannosta suurempi osa suoraan omaan käyttöön. Kuitenkin kohteen kulutuksen ollessa yli puolet pienempi sähkölämmitteisen omakotitalon kulutuksesta, kulutuksen ohjauksen vaikutus näkyy lähinnä vain pienillä, alle 10 kW:n kokoluokilla. Kuvassa 4.11 on esitetty tuulivoimalan vuotuinen tuotanto ja suoraan omaan käyttöön saatava energia tuulivoimalan koon suhteen.



Kuva 4.11 Tuulivoimalan vuotuinen tuotanto ja suoraan omaan käyttöön saatava energia tuulivoimalan koon suhteen nollaenergiatotalossa.

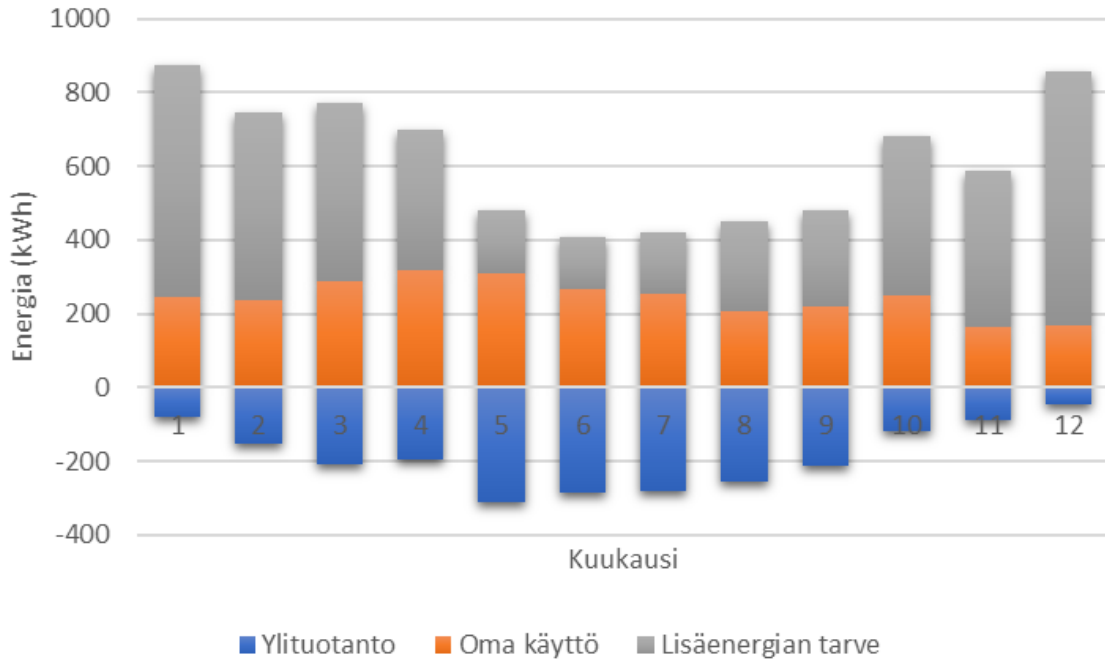
Nollaenergiatotalossa tuulivoimasta ei saada niin paljon suoraan omaan käyttöön kuin sähkölämmitteisessä omakotitalossa. Nollaenergiatotalossa ylituotanto on suurempi kuin suoraan omaan käyttöön saatava energia, kun tuulivoimalan koko on 13 kW. Tällöin tuulivoimalla tuottaa vuodessa 5490 kWh, josta suoraan omaan käyttöön saadaan 2700 kWh ja ylituotantoa on 2780 kWh. Kuvassa 4.12 on esitetty akulla tuotannosta käyttöön saatava vuotuinen energia akun koon suhteen. Aurinkovoimalan kooksi on valittu 4 kW ja tuulivoimalan 13 kW.



Kuva 4.12 Akulla tuotannosta käyttöön saatava vuotuinen energia akun koon suhteen nollaenergiatotalolla, kun tuotantojärjestelmään kuuluu 4 kW aurinkovoimala ja 13 kW tuulivoimala.

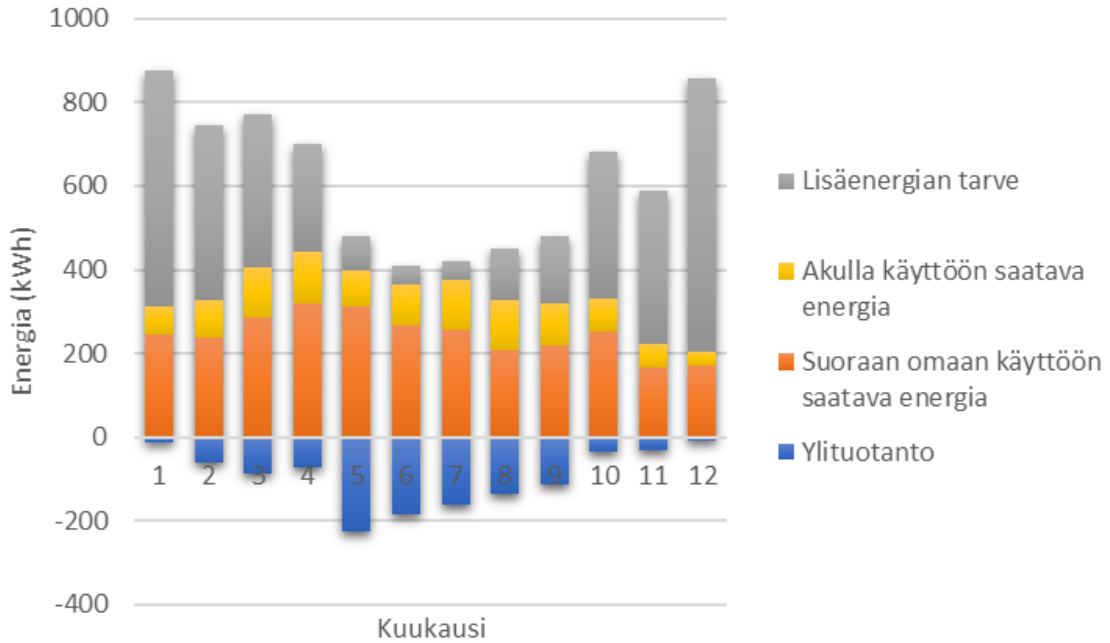
Nollaenergiatotalossa akustolla ei saada yhtä paljon energiaa tuotannosta käyttöön kuin sähkölämmitteisessä omakotitalossa, johtuen pienemmästä kulutuksesta. Akuston kokoa kasvatettaessa 10 kW suuremmaksi käyttöön saatu energia kasvaa hyvin vähän, ja yli 20 kWh akustolla käyttöön saatava energia ei kasva enää ollenkaan. 9,5 kW:n kokoisella akustolla saadaan enää puolet teoreettisesta maksimista käyttöön.

Nollaenergiatotalon järjestelmän mitoituksen tarkastelua jatkettiin samalla tavalla kuin sähkölämmitteisen omakotitalon järjestelmän mitoitusta. Mitoitustyökalun avulla päädyttiin järjestelmään, johon kuuluu 7 kW:n aurinkovoimala, 7 kW:n tuulivoimala ja 10 kWh:n akusto. Tarkastellaan ensin tästä puolitettua järjestelmää. Kuvassa 4.13 on esitetty nollaenergiatotalon kuukausittainen energiajakauma puolitetulla järjestelmällä.



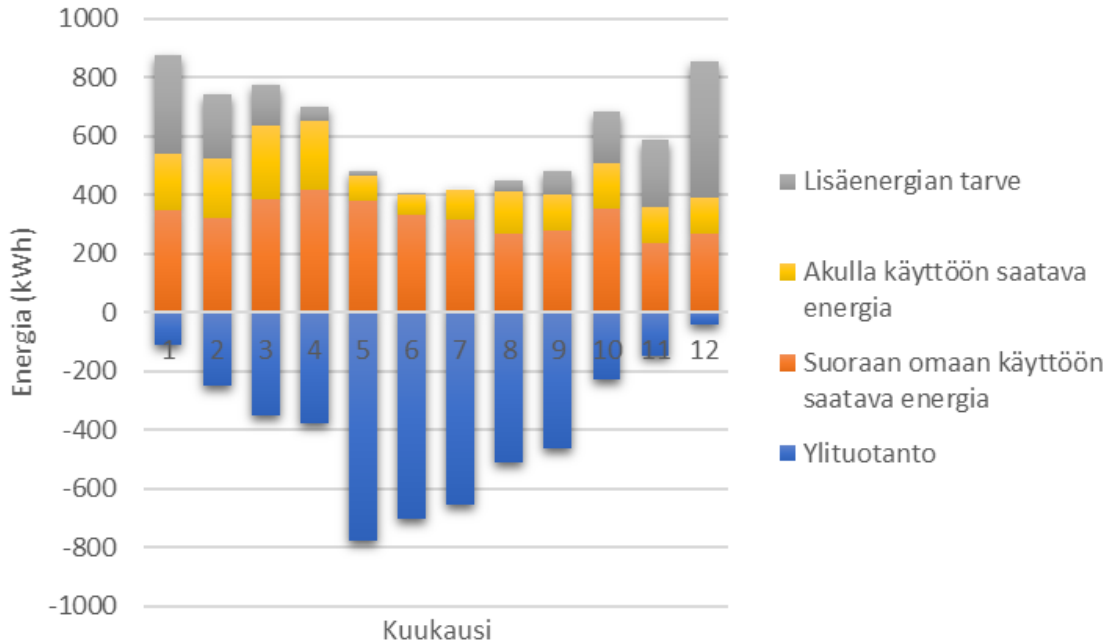
Kuva 4.13 Nollaenergiahirsisitalon kuukausittainen energiajakauma, kun järjestelmään kuuluu 3.5 kW aurinkovoimala ja 3.5 kW tuulivoimala.

Kuvasta 4.13 havaitaan, että suoraan omaan käyttöön saatava energia on isoimmillaan kesäkuukausina, toisin kuin sähkölämmitteisessä omakotitalossa. Ylituotanto on suurimmillaan kesällä myös nollaenergiahirsisitalolla, mutta ylituotantoa on huomattavasti vähemmän kuin sähkölämmitteisellä omakotitalolla. Tosin tuotantojärjestelmän kokonaisteho on kolmasosa sähkölämmitteisen omakotitalon kokonaistehosta, kun taas nollaenergiahirsisitalon vuotuinen kulutus on hieman suurempi, noin 37 % sähkölämmitteisen omakotitalon kulutuksesta. Tällä järjestelmällä nollaenergiahirsisitalon vuotuinen tuotanto on 5160 kWh, josta suoraan omaan käyttöön saadaan 2930 kWh. Ylituotantoa tulee 2220 kWh ja lisäenergian tarpeeksi jää 4520 kWh, joka on reilusti yli puolet kohteen kulutuksesta. Kuvassa 4.14 on esitetty nollaenergiahirsisitalon energiajakauma, kun järjestelmään on lisätty 5 kWh:n akusto.



Kuva 4.14 Nollaenergiahiritalon kuukausittainen energiajakauma, kun järjestelmään kuuluu 3.5 kW aurinkovoimala, 3.5 kW tuulivoimala ja 5 kWh akusto.

Samoin kuin sähkölämmitteisellä omakotitalolla, akulla käyttöön saatava energia on suurimmillaan kesällä. Nollaenergiahiritalolla kuitenkin akusto pienentää ylituotannon talvella hyvin vähäiseksi. Akulla käyttöön saadaan vuoden aikana 1090 kWh ja ylituotanto pienenee 1130 kWh:iin. Lisäenergian tarpeeksi jää 3430 kWh, joka on nyt alle puolet kohteen kuluksista. Kausivarastoa tarkasteltaessa kesän aikana vetytankkiin saataisiin varastoitua vain 230 kWh energiaa, joka vastaa 6 kg vetyä, kun talven ajaksi varastossa tulisi olla 2870 kWh energiaa, joka vastaa 73 kg vetyä. Veden elektrolyysijärjestelmä kyseisellä järjestelmällä siis auttaisi, mutta pelkästään sillä ei kohde selviäisi talvea ilman lisägeneraattoria. Kuvassa 4.15 on esitetty nollaenergiahiritalon energiajakauma, kun aikaisempi järjestelmän koko kaksinkertaistetaan.



Kuva 4.15 Nollaenergiahiritalon kuukausittainen energiajakauma, kun järjestelmään kuuluu 7 kW aurinkovoimala, 7 kW tuulivoimala ja 10 kWh akusto.

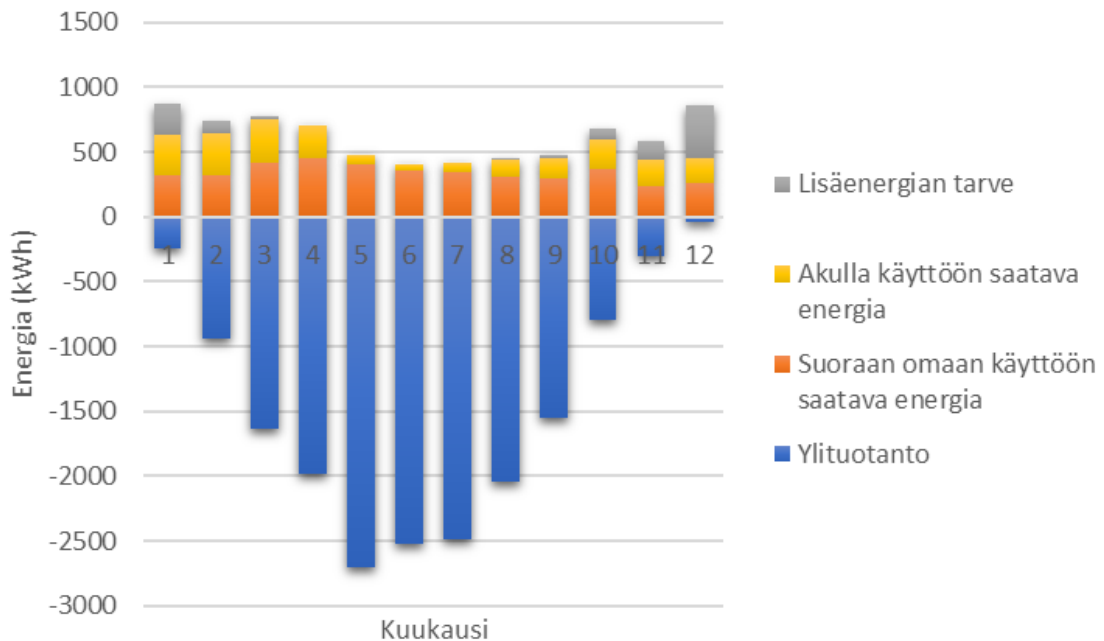
Kaksinkertaistettaessa nollaenergiahiritalon järjestelmä tuotanto kaksinkertaistuu 10 310 kWh:iin ja suoraan omaan käyttöön saatavan energian määrä kasvaa noin kolmasosan 3910 kWh:iin. Akulla käyttöön saatava energia lähes kaksinkertaistuu 1800 kWh:iin ja kuten sähkölämmitteisellä omakotitalollakin, kesäkuukausina kulutuksen vähäisyys rajoittaa akulla käyttöön saatavan energian määrää. Ylituotanto kasvaa huomattavasti varsinkin kesällä, jolloin ylituotantoa tulee lähes nelinkertainen määrä. Koko vuotena ylituotantoa tulee 4600 kWh. Lisäenergian tarpeeksi jää 1740 kWh. Kausivarastoa tarkasteltaessa lokakuun loppuun mennessä on varastoitu 2360 kWh, eli 60 kg vetyä, kun varastoidun vedyn tarve talvelle olisi 22 kg vetyä eli 880 kWh.

4.6 Nollaenergiahiritalo nykyisellä tuotantojärjestelmällään

Tässä kappaleessa tarkastellaan nollaenergiahiritalon nykyisen järjestelmän sopivuutta off-grid-järjestelmäksi. Tarkasteltavassa nollaenergiahiritalossa on tällä hetkellä asennettuna on-grid-järjestelmä, joka sisältää 20.5 kWp:n aurinkovoimalan. Aurinkovoimalasta 10 kWp on suunnattu etelään, 5.25 kWp länteen ja 5.25 kWp itään. Kaikkien paneelien kulma on 26°. Talon suunnittelun aikana vuosituotannoksi on simuloimalla saatu 17.8 MWh, ja tammi-, helmi- sekä joulukuun tuotanto pois rajattuna 16.5 MWh (Nollaenergiahiritalo

2019). Asennuskulmasta ja suuntauksista johtuen työssä käytetyllä aurinkosähkön simuloinnilla ei tuotannon arvot vastaa täysin todellisuutta, mutta antavat suuntaa siihen, miten kyseinen kohde toimisi nykyisellään off-grid-omakotitalona.

Mitoitustyökalulla PV- järjestelmä skaalattuna 20.5 kWp:iin vuotuiseksi tuotannoksi saadaan 21 550 kWh ja tammi-, helmi- ja joulukuun tuotanto pois rajattuna 19 400 kWh. Edellä tarkasteltuihin järjestelmiin vertailukelpoisuuden säilyttämisen vuoksi tarkastellaan tuotantoa kuukausia rajaamatta. Ylituotantoa järjestelmällä tulee 18 270 kWh ja lisäenergian tarpeeksi jää 4170 kWh. Lisättäessä järjestelmään 15 kWh:n akusto, omaan käyttöön saadaan 2390 kWh lisää. Vastaavasti lisäenergian tarve pienenee 1800 kWh:iin. Kuvassa 4.16 on esitetty kohteen energiajakauma, kun järjestelmään lisätään vielä 5 kW:n tuulivoimala.



Kuva 4.16 Nollaenergiatalon kuukausittainen energiajakauma, kun aurinkopaneelien koko on 20.5 kWp, tuulivoimalan 5 kW ja akuston 15 kWh.

Lisättäessä tuulivoimala järjestelmään suoraan omaan käyttöön saatava energia kasvaa, mutta akulla käyttöön saatava energia vähenee, johtuen kesäkuukausien kulutuksen vähyyden aiheuttamasta rajoittamisesta. Vuotuinen tuotanto on nyt 23 660 kWh, josta ylituotantoa on 19 540 kWh. Suoraan omaan käyttöön saadaan 4120 kWh ja akulla käyttöön saadaan

2290 kWh. Lisäenergian tarve vähenee 1040 kWh:iin. Vaikka kyseinen järjestelmä on huomattavasti ylimitoitettu, ei kulutusta saada täysin katettua talven aikana tuotantojärjestelmällä ilman lisägeneraattoria.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä päästiin tavoitteeseen. Kahden erilaisen omakotitalon kulutusprofiilit ja niiden eroavaisuudet saatiin selvitettyä. Kulutusten suurin eroavaisuus on sähkölämmitteisen omakotitalon huomattavasti suuremmat kulutuspiikit. Molemmille kohteille saatiin mitoitettua aurinko- ja tuulivoimasta sekä akustosta koostuva hybridijärjestelmä, jolla kohde pystyy toimimaan off-grid-järjestelmänä vedyn tuotantojärjestelmän tai lisägeneraattorin avulla. Vertaessa kohteita ja järjestelmiä voidaan sanoa, että off-grid-järjestelmä soveltuu paremmin nollaenergiahiritalolle, johtuen lähinnä pienemmästä kulutuksesta ja kulutuksen ohjauksesta. Sähkölämmitteisellä omakotitalolla kulutuksen ohjaus vähentäisi huomattavasti järjestelmän kokoa.

Sähköntuotannon simulaation perusteella off-grid-järjestelmässä aurinkosähköllä saadaan tuotettua enemmän sähköä kuin tuulivoimalla, mutta tuulivoimalla saadaan tasaisempi jakauma sähköntuotannolle. Investointikustannusten tarkastelun tuloksena voidaan todeta aurinkosähkön olevan kannattavampaa kuin tuulisähkön johtuen suuremmasta tuotannosta ja edullisemmasta investoinnista.

Yksi työn tuloksista on myös Excel-pohjainen mitoitustyökalu, jota voi käyttää myös tulevaisuudessa vastaavaan tarkasteluun. Työkalussa on skaalaustyökalut aurinko- ja tuulivoimalan sekä akuston koolle. Lisäksi työkaluun voi vaihtaa tarkasteltavan kulutusprofiilin tai aurinko- tai tuulivoimalan tuotantodatan.

Pienemmän kokoluokan omakotitalolla, kuten nollaenergiahiritalolla, off-grid-järjestelmän toteuttaminen voisi olla varteenotettava vaihtoehto, jos vaihtoehtoinen jakeluverkkoon liittyminen olisi haastavaa ja kustannukset olisivat suuret. Järjestelmän koon tarpeen kasvaessa järjestelmän yhteensovittaminen monimutkaistuu ja järjestelmän sujuva ja laadukas toimiminen hankaloituu. Suuret kulutukset myös vaatisivat kausivaraston, joka vaikuttaa huomattavasti

tavasti järjestelmän kannattavuuteen. Jos uusiutuvan energian investointikustannukset jatkavat laskuaan, tulevaisuudessa off-grid-järjestelmä voisi olla kannattava vaihtoehto perinteiselle on-grid-omakotitalolle.

Kausivarasto voitaisiin korvata kohteissa lisägeneraattorilla. Työssä tehdyt mitoitukset on tehty kausivarasto huomioon ottaen, joten ylituotanto on kasvatettu riittävän suureksi, jotta veden elektrolyysijärjestelmä kykenee tuottamaan aurinko- ja tuulivoimalta jäävän energian tarpeen. Mikäli kausivarasto esimerkiksi suuren investointikustannuksensa vuoksi korvattaisiin lisägeneraattorilla, ylituotantoa ei tarvittaisi. Ylituotannon vähentämiseksi tulisi pienentää tuotantojakaumien perusteella PV-järjestelmän kokoa. Myös akuston lisäys vähentäisi ylituotantoa. Kuitenkin ylituotantoa vähennettäessä lisäenergian tarve kasvaa, eikä akustolakaan saada tätä täysin katettua akuston kyllästymisen takia.

Tulevaisuudessa tutkimusta voisi jatkaa kannattavuuden tarkastelulla, jotta saataisiin paremmin selville kuinka suuri osa sähköstä on kannattavaa tuottaa aurinkovoimalla ja kuinka suuri osa tuulivoimalla. Lisägeneraattorin tapauksessa tulisi selvittää, kuinka paljon ylituotantoa on kannattavaa olla suhteessa lisägeneraattorin käytön tarpeeseen polttoainekustannukset huomioiden. Lisägeneraattorin kannattavuutta käyttökustannuksineen voisi myös verrata veden elektrolyysijärjestelmään. Tarkemmassa tutkimuksessa tulisi ottaa huomioon myös akuston tuntikohtainen käyttäytyminen akun latauksen ja purkamisen osalta. Osa akustosta voitaisiin myös korvata sähköautolla, joka toimisi liikkuvana energiavarastona, jolloin sähköautoa voitaisiin ladata latauspisteillä ja sähköverkosta voitaisiin välillisesti tuoda sähköä omakotitalon käyttöön.

LÄHTEET

Ahola, J. (2018). National Survey Report of Photovoltaic Applications in Finland 2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.2.2019]. Saatavilla https://www.researchgate.net/publication/327573292_National_Survey_Report_of_Photovoltaic_Applications_in_Finland_2017

ESE (2019). Pientuotanto ESE-verkon alueella. Yleistietolomake. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.1.2019]. Saatavilla <https://ese.fi/fi-fi/article/etusivu/pientuotanto-ese-verkon-alueella/52/>

Finlumo (2016). Aurinkopaneeli hinnat [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.01.2019] . Saatavilla <http://www.finlumo.fi/aurinkopaneeli-hinnat/>

FinSolar (2017). Aurinkosähköjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.01.2019]. Saatavilla <http://www.finsolar.net/aurinkoenergian-hankinta-ohjeita/aurinkosahkon-hinnat-ja-kannattavuus/>

Finnwind (2019). Lataustuulivoimala [verkkodokumentti]. [Viitattu 17.01.2019]. Saatavilla <https://finnwind.fi/tuote/lataustuulivoimala-1500w-48v-12m-masto/>

Koponen, J. 2015. Review of water electrolysis technologies and design of renewable hydrogen production systems. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energijärjestelmät, Sähkötekniikan koulutusohjelma. Lappeenranta. 87 s.

Kärkkäinen Web Oy (2019). Kipor KDE6500E3. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.01.2019]. Saatavilla <https://www.karkkainen.com/verkkokauppa/kipor-kde6500e3-diesel-aggregaatti-generaattori>

Lehto, I., Liuksiala, L., Lähde, P., Olenius, M., Orrberg, M., Ylinen, M., 2017. Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus. Espoo. Sähköinfo Oy. 136 s. ISBN 978-952-231-234-1.

Lumme-Energia (2019). Aurinkosähköpaketit. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.01.2019]. Saatavilla https://www.lumme-energia.fi/aurinkosahko/aurinkosahkopaketit/?gclid=EAIaIQobChMIImrOk2LWF3gIViIKyCh3MTg_DEAAYASAAEgL71PD_BwE

Menconi, M.E., dell'Anna, S., Scarlato, A., Grohmann, D., 2016. *Energy sovereignty in Italian inner areas: Off-grid renewable solutions for isolated systems and rural buildings*. Renewable Energy, vol. 93, s. 14-26. IEEE.

Misak, S., Prokop, L., 2010. *Off-grid power systems*. 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. 16.- 19.5.2010, Praha, Tšekki. IEEE.

Nagarjun, Y., 2015. *Effectiveness of On-grid and Off-grid rural electrification approaches in India*. International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA). 5.- 7-10.2015, Bandung, Indonesia. IEEE:

Nollaenergiatalo (2018). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 04.12.2018]. Saatavilla <http://www.nollaenergiatalo.fi/>

Nollaenergiahirsiatalo (2019). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.1.2019]. Saatavilla <http://www.nollaenergiahirsiatalo.fi/>

Prokop, L., Sikora, T., Misak, S., 2017. *Operation analysis of automated parking system with off-grid supply system*. 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering. 17.- 19.5.2017, Kouty nad Desnou, Tšekki. IEEE.

Saaristotekniikka (2019). Istabreeze windsafe. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.01.2019]. Saatavilla <http://verkkokauppa.saaristotekniikka.com/product/245/2kw-48volt-tuulivoima-ista-breeze-windsafe>

Suomen tuulivoimayhdistys (2019). Tietoa tuulivoimasta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.1.2019]. Saatavilla <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/pientuulivoima>

Tesla (2019). Powerwall. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.01.2019]. Saatavilla https://www.tesla.com/fi_FI/powerwall

Tilastokeskus (2019). Hinnat ja kustannukset. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 21.01.2019]. Saatavilla https://www.tilastokeskus.fi/tup/suoluk/suoluk_hinnat.html

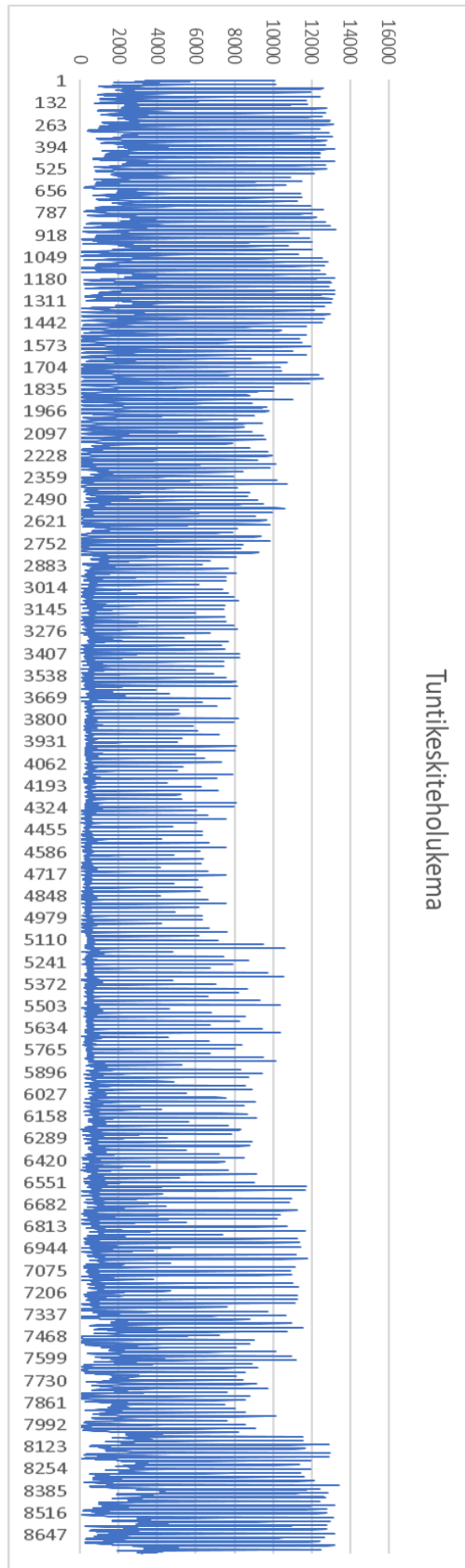
Tuuliatlas (2018). Suomen tuulitiedot. [Verkkodokumentti] [Viitattu 12.1.2019]. Saatavilla <http://www.tuuliatlas.fi/fi/index.html>

Vakkilainen, E., Kivistö, A. 2017. Sähkön tuotantokustannusvertailu. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 26 s. ISBN 978-952-335-124-0. Saatavilla <http://lutpub.lut.fi/handle/10024/143861>

Ympäristöhallinnon verkkopalvelu (2018). [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.1.2019]. Saatavilla https://www.environment.fi/fi-FI/Vesi/Vesitilanne_ja_ennusteet

LIITTEET

Liite 1. Sähkölämmitteisen omakotitalon tyypikulutusprofiili L2.



Liite 2. Nollaenergiahiritalon kulutustiedot vuodelta 2017.

