



Mikko Halme

Kotitalouksien akkujärjestelmät osana reservimarkkinaa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

3.3.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Mikko Halme
Otsikko: Kotitalouksien akkujärjestelmät osana reservimarkkinaa
Sivumäärä: 21 sivua
Aika: 3.3.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine: Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat: Yliopettaja Jarno Varteva

Opinnäytetyössä selvitetään markkinoilla olevia kotitalouksille markkinoituja akkujärjestelmiä ja niiden hyödyntämistä reservimarkkinoilla. Opinnäytetyön tavoitteena on saada ajantasainen tilannekuva akkujärjestelmien teknisistä ominaisuuksista, taloudellisesta kannattavuudesta sekä sähkön reservimarkkinoiden toiminnasta. Opinnäytetyössä hyödynnetään alan kirjallisuutta, verkkolähteitä sekä aikaisempia opinnäytteitä.

Opinnäytetyön aihe on ajankohtainen. Kantaverkkoyhtiö Fingrid avaa uusia reservituotteita sähkön reservimarkkinoille. Kotitalouksilla on mahdollisuus osallistua näille markkinoille reservitoimittajien avulla. Yritykset markkinoivat globaalisti akkujärjestelmiään kuluttajille mainiten mahdollisuudesta suuriin tuottoihin.

Opinnäytetyö käsittelee akkujärjestelmien teknisiä ominaisuuksia ja kuluttajille markkinoituja akkujärjestelmiä. Työssä kerrotaan reservimarkkinoiden toiminnasta sekä erilaisista reservituotteista. Akkujärjestelmien taloudellista kannattavuutta arvioidaan esimerkkilaskelmien avulla. Opinnäytetyössä pohditaan myös akkujärjestelmien tulevaisuutta sekä kehitystarpeita.

Opinnäytetyön lopputulos tarjoaa ajantasaisen näkymän akkujärjestelmistä ja reservimarkkinoista. Opinnäytetyötä voidaan hyödyntää päätöksenteon tukena pohdittaessa akkujärjestelmäinvestoinnin järkevyyttä.

Avainsanat: akkujärjestelmä, reservimarkkina

Tämän opinnäytetyön alkuperä on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

Abstract

Author: Mikko Halme
Title: Residential Battery Energy Storage Systems as a Part of the Reserve Market
Number of Pages: 21 pages
Date: 3 March 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Professional Major: Electrical Power Engineering
Supervisors: Jarno Varteva, Principal Lecturer

This thesis study investigates commercially available battery energy storage systems marketed for households and their potential utilization in electricity reserve markets. The objective is to provide an up-to-date overview of the technical characteristics of battery systems, their economic viability, and the functioning of the electricity reserve markets.

The research methodology employed in this thesis study includes a review of relevant literature, online resources, and previous theses on the subject.

The topic is highly relevant due to recent developments in the electricity market. Fin-Grid, the Finnish transmission system operator, is introducing new reserve products to the electricity reserve markets. This creates opportunities for households to participate in these markets through aggregators acting as reserve providers. Globally, companies are marketing battery storage systems to consumers, often highlighting the potential for significant financial returns.

This thesis study covers several key aspects. It examines the technical characteristics of battery energy storage systems and specifically focuses on systems marketed for residential use. It also explains the operation of reserve markets and describes various reserve products. The economic viability of battery energy storage systems is assessed using illustrative examples and calculations. Furthermore, the thesis study discusses the prospects and development needs of battery energy storage system technology.

The findings of this thesis offer a current perspective on energy storage technology and reserve markets. The results can be used to support decision-making when considering the feasibility of investing in a battery energy storage system for household use.

Keywords: Battery energy storage system, reserve market

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kotitalouksien akkujärjestelmät	2
2.1	Litiumrautafosfaattiakku	3
2.2	Akunhallintajärjestelmä ja akun toiminnan ohjaus	4
3	Sähköjärjestelmän reservimarkkinat	5
3.1	Reservikapasiteettituotteet	5
3.2	Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat	7
4	Kotitalouksien akkujärjestelmien mahdollisuudet reservimarkkinoilla	9
4.1	Tekniset vaatimukset	10
4.2	Taloudellinen potentiaali kotitalouksille	11
4.3	Akkujärjestelmien rooli sähköverkon joustavuuden ja vakauden ylläpidossa	15
5	Kehitystarpeet ja tulevaisuuden näkymät	16
5.1	Kotitalouksien akkujärjestelmien kehitystarpeet	16
5.2	Tulevaisuuden näkymät	17
6	Yhteenveto	18
	Lähteet	20

Lyhenteet

- aFRR: *Automatic Frequency Restoration Reserve*, keskitetty ja automaattisesti kantaverkkoyhtiön signaalilla aktivoituva taajuuden palautusreservi.
- BMS: *Battery management system*, akkua haitalliselta toiminnalta suojaava akunhallintajärjestelmä.
- FCR-D: *Frequency Containment Reserve for Disturbance*, taajuusohjattu häiriöreservi on reservimarkkinatuote, joka pyrkii pitämään sähköverkon taajuuden 49,5–50,5 Hz:n välillä.
- FCR-N: *Frequency Containment Reserve for Normal Operation*, automaattisesti käynnistyvä taajuusohjattu käyttöreservi, joka pyrkii pitämään sähköverkon taajuuden normaalilla käyttöalueella 49,9–50,1 Hz.
- FRR: *Fast Frequency Reserve*, sähköverkon pienen inertian tilanteita varten olemassa oleva nopea taajuusreservi.
- LiFePO₄: *Lithium iron phosphate*, LFP-akuissa käytettävä katodimateriaali litiumrautafosfaatti.
- LFP: *Lithium ferrophosphate battery*, litiumrautafosfaattiakku.
- Li-ion: *Lithium-ion battery*, litiumioniakku.
- Li-S: *Lithium-sulfur battery*, litiumrikkiakku.
- NiCd: *Nickel Cadmium battery*, nikkelikadmiumakku.

1 Johdanto

Energiamurros ja akkuteknologian kehitys ovat luoneet tilanteen, jossa yritykset markkinoivat aktiivisesti akkujärjestelmiään kuluttajille. Kantaverkkoyhtiö Fingrid on myös lisännyt reservimarkkinatuotteita mahdollistaen kotitalouksien akkujärjestelmien aggregoinnin verkkotoimittajan toimesta. Yritysten markkinointimateriaalissa saatetaan luvata tuhansien eurojen vuosituloja akkujärjestelmän käytöstä. Ollaan tilanteessa, jossa yhä useampi kuluttaja pohtii akkujärjestelmän hankintaa ja sen hyödyllisyyttä.

Akkujärjestelmää hankkiessa on hyödyllistä ymmärtää akkujen toimintaa ja teknisiä ominaisuuksia. Olennaisia ovat energiatiheys, kuormitusjaksojen määrä ja purkaantumisvyvyys. Litiumioniakut ovat yleisimpiä kotitalouksille tarjottavista akuista korkean energiatihedyn ja pitkän käyttöiän takia. Akkujärjestelmiä hallitaan ohjelmistoilla, usein tekoälypohjaisilla, jotka optimoivat latauksen sähkön hinnan ja kulutuksen mukaan.

Sähköjärjestelmän reservimarkkinoilla ylläpidetään sähköverkon tasapainoa säätämällä tuotantoa ja kulutusta verkon taajuuden mukaan. Saadakse taloudellista hyötyä reservimarkkinoille osallistumisesta akkujärjestelmä tulee aggregoida verkkotoimittajan toimesta. Tämä mahdollistaa yksittäisen kuluttajan osallistumisen reservimarkkinoille.

Tämä insinööriyö perehtyy tarkemmin kotitalouksien akkujärjestelmiin, niiden teknisiin ominaisuuksiin, toimintaperiaatteisiin ja mahdollisuuksiin osallistua sähköjärjestelmän reservimarkkinoille. Työssä kerrotaan myös reservimarkkinan reservituotteista ja niiden aggregoinnista. Lisäksi tarkastellaan akkujärjestelmien taloudellista potentiaalia kotitalouksille. Lopuksi arvioidaan kotitalouksien akkujärjestelmien tulevaisuuden näkymiä.

2 Kotitalouksien akkujärjestelmät

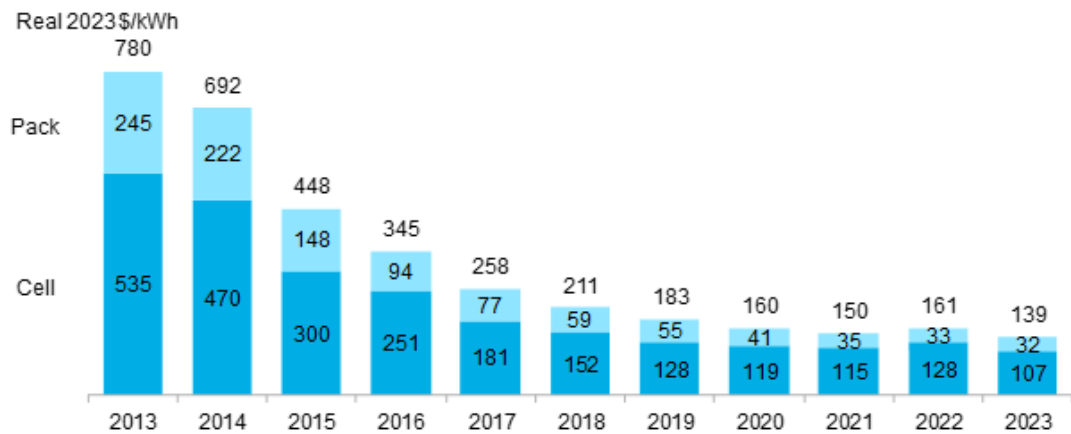
Akkujärjestelmien teknisiä ominaisuuksia vertailtaessa oleellisia ominaisuuksia ovat akun energiatiheys, kuormitusjaksojen määrä sykleissä sekä purkaantumisvyvyys. Lisäksi akkujärjestelmä tarvitsee toimiakseen invertterin, jolla verkosta saatava vaihtojännite voidaan muuntaa tasajännitteeksi ja päinvastoin. Tämä mahdollistaa akkujärjestelmän optimaalisen hyödyntämisen. [1, s. 12–13.]

Akun energiatiheys kertoo sen käyttöajasta suhteessa sen kokoon. Esimerkiksi hyvin yleisesti käytetyissä eri litiumioniakkutyypeissä energiatiheys on välillä 50–260 Wh/kg. Markkinoilta löytyy myös korkeamman energiatiheyden akkuja. Kuormitusjaksojen määrä kertoo, kuinka monta kertaa akun voi ladata tyhjästä täyteen ja kuluttaa jälleen tyhjäksi. Tätä kutsutaan sykliksi. Esimerkiksi Litiumrautafosfaattiakkujen käyttöikä sykleissä mitattuna on välillä 2 000–10 000 kertaa. Käyttöikään vaikuttavat lämpötila, latausvirta sekä purkautumisvyvyys. Purkaantumisvyvyys tarkoittaa sitä, kuinka suuri osuus akun maksimikapasiteetista ampeeritunteina käytetään tai ladataan yhdellä käyttökerralla. [1, s. 12–13.]

Kehitettyjä akkuteknologioita on paljon, ja ne eroavat toisistaan muun muassa teknisiltä ominaisuuksiltaan, ympäristövaikutuksiltaan sekä hinnaltaan. Vanhin niistä on lyijyakku, joka on edullinen, mutta teknisiltä ominaisuuksiltaan muita heikompi. Muita paljon käytettyjä akkutyyppisiä ovat esimerkiksi nikkelikadmium (NiCd), ja litiumioni (Li-ion). [2, s. 27.]

Litiumioniteknologian markkinaosuus akuissa vuonna 2024 oli maailmanlaajuisesti yli 44 % [3]. Litiumakkujen etuja ovat korkea energiatiheys, pitkä käyttöikä ja keveys. Litiumakkutyyppejä on useita erilaisia, mutta kotitalouksille myytävissä akkujärjestelmissä käytetään pääasiassa litiumrautafosfaatti eli LiFePO₄ tai LFP-akkuja. Litiumioniakkujen hinnat ovat tippuneet (kuva 1) viime vuosikymmenen aikana, ja suunta näyttää edelleen alaspäin. Tämän kaltainen hintakehitys enteilee akkujärjestelmien yleistymistä muun muassa kotitalouskäytössä seuraavan vuosikymmenen aikana.

Figure 1: Volume-weighted average lithium-ion battery pack and cell price split, 2013–2023



Source: BloombergNEF. Historical prices have been updated to reflect real 2023 dollars. Weighted average survey value includes 303 data points from passenger cars, buses, commercial vehicles, and stationary storage.

Kuva 1. Tilavuuspainotettu keskimääräinen litiumioniakkupaketin hinnan jakauma vuosina 2013–2023. Hinnat muutettu vastaamaan vuoden 2023 dollarin arvoa. [4.]

2.1 Litiumrautafosfaattiakku

Litiumioniakuista puhuttaessa on hyvä muistaa kyseessä olevan akkuperhe, jonka ominaisuudet vaihtelevat katodina käytettävän aktiiviaineen mukaan [5, s. 30]. Aktiiviaine on litiumyhdiste, jonka perusteella akkukennon tyyppi nimetään. Akkukennossa on katodi, joka on positiivinen elektrodi, ja anodi, joka on negatiivinen elektrodi. Näiden välissä on elektrolyyttiliuos. Liuoksessa on separaattorikalvo, joka päästää läpi litiumionit muttei johda sähköä. Akkua ladattaessa ionit kulkevat katodilta anodille, ja kun akusta otetaan virtaa, ionit kulkevat anodilta katodille. [5, s. 28–29.]

LFP- ja LiFePO₄-akuissa kennojen katodiaineena on litiumrautafosfaatti. LFP-kennojen jännite pysyy purkautumisen aikana hyvin vakaana [5, s. 30]. Tästä on hyötyä tasaisena tehon tuottona. LFP-kennot kestävät suuria purkuvirtoja, mikä tekee litiumrautafosfaattiakuista hyvän vaihtoehdon esimerkiksi käsityökaluihin. LFP-kennoilla on hyvin korkea syttymislämpötila, mikä tekee tästä akkukemiasta verrattain turvallisen vaihtoehdon. LFP-akkujen edullisuuteen

vaikuttaa raudan ja fosforin edullinen hinta verrattuna akkukemioihin, jotka käyttävät harvinaisia maametalleja. [5, s. 30–31.]

2.2 Akunhallintajärjestelmä ja akun toiminnan ohjaus

Akun tehokkaan toimimisen ja pitkän käyttöiän varmistamiseksi edellytetään akunhallintajärjestelmän (battery management system, BMS) käyttöä. Väärä käyttölämpötila, yllilataaminen tai ylipurkaminen voivat tuhota akun tai ainakin heikentää sen kapasiteettia. Akunhallintajärjestelmä suojelee akkua näissä tilanteissa estäen haitallisen toiminnan. Akunhallintajärjestelmät voidaan luokitella analogisiin tai digitaalisiin sekä suojapiireihin tai valvontapiireihin. Analogiset piirit ovat halpoja ja sopivat yksinkertaisiin ja pieniin akkuihin. Digitaaliset järjestelmät ovat vapaasti ohjelmoitavissa. Niistä voidaan ottaa ulos dataa, jota voidaan hyödyntää esimerkiksi vian etsinnässä. Suojapiiriksi kutsutaan yksinkertaista elektronista piiriä, joka estää lataamasta akkua liian täyteen tai purkamasta sitä liian tyhjäksi. Valvontapiiri valvoo akun toimintaa suojapiiriä kattavammin. [5, s. 62.]

Akkujärjestelmää hallitaan monesti palveluntarjoajan ohjelmistolla. Ohjelmisto voi olla tekoälyllä toimiva. Tällöin akustoa ohjataan automaattisesti latautumaan halpoina tunteina ja käyttämään varastoitua sähköä hinnan ollessa korkeampi. Suuremman hyödyn tästä saa, jos kotitaloudessa on myös aurinkopaneelit. Tällöin aurinkopaneelien ylituotanto voidaan varastoida akkujärjestelmään. Tekoälypohjainen malli kykenee ennustamaan sähkön kulutusta tarkkailemalla kotitalouden sähkön käyttöä. Tekoäly hyödyntää myös sääennusteita optimoidessaan akkujärjestelmän toimintaa. [6; 7.]

Yksittäisiä akkujärjestelmiä yhdistetään järjestelmävaatimukset täyttäväksi virtuaaliseksi akkujärjestelmäksi. Näin voidaan täyttää Fingridin tekniset vaatimukset mahdollistaen reservimarkkinoille osallistumisen [7].

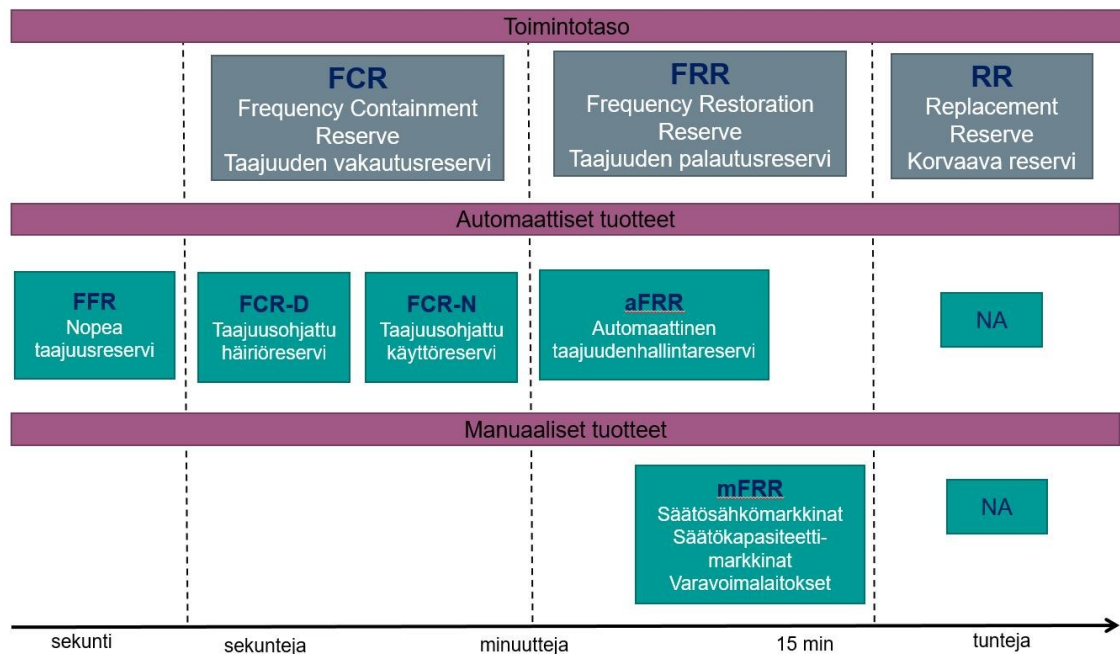
3 Sähköjärjestelmän reservimarkkinat

Sähköjärjestelmän reserveillä tarkoitetaan energiavarastoja, sähkön tuotantoa sekä kulutuskohteita, jotka muuttavat tehoan tilanteen vaatimalla tavalla. Tämä tasapainotus tapahtuu reservimarkkinoilla. Sähköverkon tasapainon säilymistä vakaana kuvaa verkon taajuus, joka Suomessa on 50,0 Hz. Jos sähkön kulutus on tuotantoa suurempi, taajuus laskee. Kulutuksen ollessa pienempi taajuus nousee. Taajuuden sallitaan vaihdella $\pm 0,1$ Hz [7]. Sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat kulutuksensa ja tuotantonsa etukäteen, mutta toteutuman poikkeudessa suunnitellusta Fingrid hankkii tarvittavan tasapainotuksen reservimarkkinoille sitoutuneilta toimijoilta [9].

3.1 Reservikapasiteettituotteet

Reservituotteita on erilaisia, ja ne voidaan luokitella kolmeen ryhmään käyttötarkoituksensa perusteella, kuten kuvassa 2 on esitetty. Taajuuden vakautusreservi on nopea reservituote, jonka automaattinen aktivointi tapahtuu korkeintaan minuuteissa. Sitä käytetään jatkuvaan taajuuden tasapainottamiseen. Taajuuden palautusreservi on noin 15 minuutissa käyttöön otettava reservi, jonka tarkoituksena on vapauttaa nopeatoimiset taajuuden vakautusreservit ja palauttaa taajuus normaalialueelle. Taajuuden palautusreservissä on automaattisesti sekä manuaalisesti aktivoitavia reservituotteita. Kolmas reservituoteryhmä on korvaavat reservit, joilla vapautetaan aiemmin aktivoituneet reservituotteet. Tarkoituksena on myös varautua häiriötilanteiden jälkeisiin vikoihin. Tätä tuotetta ei ole käytössä pohjoismaisessa sähköjärjestelmässä. [9.]

Vuodesta 2020 alkaen Pohjoismaissa on käytetty nopeaa taajuusreserviä, jota hyödynnetään taajuuden hallinnassa tilanteissa, joissa sähköjärjestelmän inertia on alhainen. Nopea taajuusreservi aktivoituu automaattisesti korkeintaan reilussa sekunnissa. Tämä reservi täydentää taajuuden vakautusreservejä. [9.]



Kuva 2. Reservituotteiden jaottelu aktivointiajan ja käyttötarkoituksen mukaan [9].

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi

Taajuusohjattu käyttöreservi ((Frequency Containment Reserve for Normal Operation, FCR-N) on automaattisesti käynnistyvä pätötehoreservi, joka pyrkii pitämään taajuuden normaalilla käyttöalueella 49,9–50,1 Hz. Taajuusohjatun käyttöreservin vaatimuksena on kyky alas- ja ylössäätöön. Taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances, FCR-D) on myös automaattisesti aktivoituva pätötehoreservi, joka on jaettu erillisiin ylös- ja alassäätötuotteisiin. Taajuusohjattu häiriöreservi pyrkii pitämään taajuuden 49,5–50,5 Hz:n välillä. Ylössäädössä sähkön tuotantoa lisätään tai kulutusta vähennetään. Alassäädössä sähkön tuotantoa vähennetään tai tuotantoa lisätään. [10.]

Taajuusohjatun käyttö- ja häiriöreservin toimittajien tulee täyttää Fingridin tekniset vaatimukset, jotka testataan säätökokeilla ennen markkinoille osallistumista. Reservin tehoja ohjataan paikallisesti automatiikan välityksellä perustuen taajuusmittaukseen. [10.]

Nopea taajuusreservi

Nopea taajuusreservi (Fast Frequency Reserve, FFR) on sähköverkon pienen inertian tilanteita varten hankittava sähköreservi. Sähköverkossa inertiaalla tarkoitetaan pyöriin massoihin varastoitunutta liike-energiaa ja sen kykyä vastustaa muutosta. Sähköjärjestelmän inertian määrä ja sähköjärjestelmässä ilmenevän vian suuruus vaikuttavat tarvittavan nopean taajuusreservin määrään. Nopeaa taajuusreserviä on käytetty Pohjoismaissa vuodesta 2020. [11.]

Automaattinen taajuuden palautusreservi

Automaattinen taajuuden palautusreservi (Automatic Frequency Restoration Reserve, aFRR) on keskitetty ja automaattisesti kantaverkkoyhtiön signaalilla aktivoitua taajuuden palautusreservi. Kantaverkkoyhtiöltä lähtee signaali reservitoimittajalle, kun se havaitsee taajuuspoikkeaman pohjoismaisella synkronialueella. Taajuuden säädön tulee aktivoitua viidessä minuutissa, ja sen vähimmäiskoko on 1 MW. [12.]

3.2 Säättö- ja säätökapasiteettimarkkinat

Säättö- ja säätökapasiteettimarkkinat on pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden yhteisesti ylläpitämä kauppapaikka, johon reservitoimittaja voi jättää tarjouksen säätökykyisestä kapasiteetistaan. Mikäli reservitoimittajan tarjous hyväksytään, maksetaan siitä tuntikohtainen markkinahintainen korvaus. Kantaverkkoyhtiöt tilaavat tarvitsemansa määrän tarjouksia säättö- ja säätökapasiteettimarkkinoilta hallitukseen sähköjärjestelmää normaali- ja häiriötilanteessa. [13.]

Fingrid maksaa säätökapasiteettimarkkinan tarjouskilpailussa hyväksytyille osapuolille kapasiteettikorvauksen riippumatta siitä, aktivoitko säätöjä. Tarjouskilpailu määrittää kunkin hankintajakson korvauksen. Kuten kuvasta 3 huomataan, ylös- ja alaspäin säätötarjous tarkoittaa sähkön tuotannon lisäämistä tai kulutuksen vähentämistä. Alaspäin säätötarjous puolestaan tarkoittaa sähkön tuotannon vähentämistä tai kulutuksen lisäämistä. Kaikista säätötarjouksista laaditaan

säätötarjouslista, jossa tarjoukset ovat hintajärjestyksessä. Ylössäätötarjouksista käytetään halvin ensin ja alassäätötarjouksista kallein. Jos tarjousta ei voida käyttää, valitaan listalta seuraava tarjous. [13.]

Säätösähkön hinnat määräytyvät säätösähkömarkkinoilla jokaiselle käyttötunnille määritetyillä ylös- ja alassäätöhinnoilla. Ylössäätöhinta määräytyy kalleimman tilatun ylössäätötarjouksen hinnan mukaan ja alassäätö halvimman (kuva 3). Kaikki Fingridin tilaamat ylössäätötarjoukset kyseisen tunnin aikana saavat siis maksun tämän kalleimman hinnan mukaan ja alassäätötarjoukset halvimman hinnan mukaan. Säätökapasiteettimarkkinalla kapasiteettikorvaus maksetaan kalleimman hyväksytyin tarjouksen mukaisesti. [13.]



Kuva 3. Säätötarjouksien toiminnallisuus [13].

Reservimarkkinoiden vaatimukset akkujärjestelmille

Osallistuakseen reservimarkkinoille tulee täyttää vaaditut tekniset vaatimukset ja markkinapaikan edellytykset. Lisäksi kohteen tulee sijaita Suomessa ja olla suoraan kytkettävissä Suomen sähköverkkoon. Aggregoitaessa huomioidaan kohde kokonaisuudessaan, vaikka yksittäinen resurssi ei vaatimuksia täyttäisi. Toisin sanoen reservitoimittaja voi yhdistää kotitalouksien akkujärjestelmiä reservituotteen vaatimukset täyttäväksi reservituotteeksi. Kuluttaja solmii

sopimuksen reservitoimittajan kanssa, ja reservitoimittajan vastuulle jää velvoite vaatimusten täyttämistä. [14.]

4 Kotitalouksien akkujärjestelmien mahdollisuudet reservimarkkinoilla

Yksittäisen kotitalouden sähkön tuotanto, kulutus tai akkujen säätökapasiteetti ei riitä suoraan reservimarkkinoille. Reservimarkkinoilla minimitarjouskoko on 100 tai 1 000 kW. Kotitalouksien akkujärjestelmiä voidaan kuitenkin koota suuremmiksi kokonaisuuksiksi, joita reservitoimittaja myy eteenpäin reservimarkkinoille. Aggregoiva yritys tekee sopimuksen kotitalouden kanssa akkujärjestelmän käytöstä reservimarkkinoilla ja maksaa siitä korvauksen akkujärjestelmän haltijalle. Aggregaattorilla on myös oltava sopimus Fingridin kanssa, jotta se voi toimia reservitoimittajana. [15.]

Kuvassa 4 näkyvät tällä hetkellä itsenäisesti aggregoitavat reservituotteet, eli ne tuotteet, joita reservitoimittaja voi myydä kantaverkkoyhtiölle. Nämä ovat taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D), taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja nopea taajuusreservi (FFR). Automaattinen palautusreservi (aFRR) saadaan itsenäiseen aggregointiin arviolta vuoden 2025 toisella neljänneksellä ja säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat vuoden 2026 aikana. [16.]

Itsenäinen aggregointi Fingridin reservimarkkinoilla

Tilanne 9/2024

FCR-D	FCR-N	FFR	aFRR
<ul style="list-style-type: none"> Itsenäinen aggregointi sallittu 1.1.2017 alkaen Minimitarjouskoko 1 MW Kapasiteettikorvaus reservitoimittajalle Ei energiamaksua tai tasepoikkeamakorjausta <ul style="list-style-type: none"> Aktivoinnin aiheuttama energiavaikutus on vähäinen Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. 	<ul style="list-style-type: none"> Itsenäinen aggregointi sallittu 1.1.2018 alkaen Minimitarjouskoko 0,1 MW Kapasiteettikorvaus reservitoimittajalle Energiamaksu ja tasepoikkeamakorjaus <ul style="list-style-type: none"> Säätöenergia korjataan ja korvataan (tasepoikkeaman hinnalla) kokonaisuudessaan reserviresurssin sähkömyynän tasevastaavalle Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. 	<ul style="list-style-type: none"> Itsenäinen aggregointi sallittu 12.5.2020 alkaen Minimitarjouskoko 1 MW Kapasiteettikorvaus reservitoimittajalle Ei energiamaksua tai tasepoikkeamakorjausta <ul style="list-style-type: none"> Aktivoinnin aiheuttama energiavaikutus on vähäinen Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. 	<ul style="list-style-type: none"> Arvioitu itsenäisen aggregoinnin käyttöönotto maaliskuuhun 2025
<p>Itsenäinen aggregointi ei ole vielä mahdollista mFRR-tuotteessa. Itsenäisen aggregoinnin käyttöönotto mFRR-tuotteessa on arvioitu vuoden 2026 aikana.</p>			<p>FINGRID</p>

Kuva 4. Reservimarkkinatuotteiden itsenäinen aggregointi reservimarkkinoilla [16].

Kotitalouksien reservimarkkinoilta saataviin tuottoihin vaikuttavat reservitoimittajan kanssa solmittu sopimus, sähkön markkinahinnat sekä reservikäytöstä aiheutuvat kulut. Kuluja voivat tuottaa sähkön siirtomaksut sekä maksettavat verot. Akuston lataus- ja purkukertojen määrä saattaa myös kasvaa. [15.]

Kotitalouden harkitessa akkujärjestelmän hankintaa ja reservimarkkinoille osallistumista sen on syytä ottaa huomioon seuraavat asiat. On oleellista tarkistaa, onko reservitoimittajalla sopimus Fingridin kanssa reservimarkkinoille osallistumisesta [17]. Pystyykö palveluntarjoaja luotettavasti toimittamaan tarjoamansa palvelun ja mihin tuottolaskelmat perustuvat? Akkujärjestelmän reservikäyttö myös rajoittaa akuston omaa käyttöä reservitoimittajan kanssa sovitun sopimuksen mukaisesti. [15.]

4.1 Tekniset vaatimukset

Kuten aiemmin jo mainittiin, kotitalouden akkujärjestelmän on täytettävä reservimarkkinoiden säädökset ja laitteiston vaaditut tekniset parametrit. Näiden täyttämistä huolehtii reservitoimittaja. Reservitoimittajan vastuulla on myös

huolehtia reservituotteensa teknisestä yhteensopivuudesta säätökokeilla. Säätökokeet tehdään automaattisille reservituotteille aFRR, FCR ja FFR. [14.]

Akkujärjestelmän hankkimista kotiin harkitsevan ei tarvitse huolehtia teknisistä vaatimuksista, sillä akkujärjestelmiä myydään käyttövalmiina tuotepaketteina. Tuote räätälöidään kohteen ominaisuuksien mukaan sisältäen tavanomaisesti akuston, invertterin sekä asennuksen. Akuston koko määräytyy kohteen sähkön tuotannon ja kulutuksen mukaan. Aurinkopaneeleita myydään monesti akkujärjestelmäpaketin ohessa tehostamaan järjestelmästä saatavaa hyötyä.

4.2 Taloudellinen potentiaali kotitalouksille

Akkujärjestelmästä saatavaan tuottoon vaikuttaa pääasiassa reservitoimittajan kanssa solmittu sopimus sekä akkujärjestelmän hankintahinta. Akkujärjestelmän koko vaikuttaa luonnollisesti sen hintaan ja takaisinmaksuaikaan. Akkujärjestelmän toimintaa hallitaan ohjelmiston avulla. Tämä antaa mahdollisuuden optimoida akkujärjestelmän latauksen ja käyttämisen ajankohtia, esimerkiksi hyödyntämällä halvan sähkön tunteja akun lataukseen. Akkujärjestelmän optimaalinen hyödyntäminen vaatii pörssisähkösopimuksen. Se mahdollistaa halpojen tuntien hyödyntämisen.

Eräs Suomen markkinoille akkujärjestelmiä toimittava yritys mainostaa 2 200–3 000 euron vuosituottoja akkujärjestelmän käytöstä todeten kuitenkin todellisten tulojen saattavan poiketa tästä arviosta. Kyseinen laskelma on tehty käyttäen 15 kW:n akkujärjestelmää, josta 5 kW on varattu reservikäyttöön. Tämä laskelma ei kuitenkaan sisällä kuluja. Toinen yritys tarjoaa 14 kW:n, 21 kW:n ja 28 kW:n akkujärjestelmiä. Näissä laskelmissa oletetaan akkujärjestelmän haltijan omistavan myös aurinkopaneelit. Akkujärjestelmän hankinta ei kuitenkaan edellytä aurinkopaneelien omistamista tai niiden hankintaa. Akkujärjestelmälaitteistoon kuuluu hybridi-invertteri, jota voi hyödyntää aurinkopaneelien kanssa tulevaisuudessa. Laskelmat perustuvat noin sataan oikeaan pientalon sähkönkulutusprofiliin välillä 12/2022–11/2023. [18; 19.] Kuvassa 5 on 7 kWh:n akkumoduuleja, joita voidaan koota päällekkäin akkujärjestelmäksi.



Kuva 5. Modulaarinen akkujärjestelmä [19].

Taulukossa 1 on esimerkkilaskelma 14 kW:n akkujärjestelmästä alle 100 m²:n kohteessa, jossa on myös aurinkopaneelit. Laskelmassa huomioidaan halpojen tuntien hyödyntäminen, aurinkopaneeleista saatava hyöty sekä akkujärjestelmän hankintahinta.

Taulukko 1. Esimerkkilaskelma 14 kW:n järjestelmästä, jonka vuosikulutus on alle 15 000 kWh. Tyypillisesti alle 100 m²:n rakennus (muokattu lähteestä Elisa Oyj esimerkkilaskelmat). [19.]

Tuottovaikutus	Tuotto kuukaudessa	Huomioitavaa
Kuormansiirron hyöty	+ 15,19 €/kk	vaihteluväli 0,14 €/kk— 36,241 €/kk
Akkureservihyvyys	+ 35 €/kk	arvio keskimääräisestä tuotosta
Aurinkopaneelien tuoton varastointi	+15 €/kk	tuotto riippuu sähkön hinnasta sekä paneelien tuotosta
Aurinkopaneelin hybridi- invertteri	+15 €/kk	laskelma 10 vuoden käyttöajalla ja 1 800 € hankintahinnalla
Laitteiston kustannus	−52,99 €/kk	kokonaishinta 6 348 €
Kokonaistuotto	= 27,20 €/kk	vuosituotto noin 330 €

Kuormansiirron vaihteluvälin vaikutus kokonaistuottoon vuodessa on noin ± 160 euroa vaikuttaen oleellisesti laitteiston hankintakulujen kuolettamisaikaan sekä kokonaistuottoon. Myös aurinkopaneeleista saatava hyöty sekä sähkön markkinahinta vaikuttavat oleellisesti. Kun laskelmasta poistetaan aurinkopaneeleista saatava hyöty, jää kokonaistuotoksi vuoden ajalta −30 euroa. Huomioitaessa myös kuormansiirron vaihteluväli ± 160 euroa saattaa vuosituotto jäädä reilusti tappiolliseksi.

Taulukossa 2 on esimerkkilaskelma 21 kW:n akkujärjestelmästä 100–200 m²:n kohteessa, jossa on myös aurinkopaneelit. Laskelmassa huomioidaan halpojen tuntien hyödyntäminen, aurinkopaneeleista saatava hyöty sekä akkujärjestelmän hankintahinta.

Taulukko 2. Esimerkkilaskelma 21 kW:n järjestelmästä, jonka vuosikulutus on 15 000–20 000 kWh. Tyypillisesti 100–200 m²:n rakennus (muokattu lähteestä Elisa Oyj esimerkkilaskelmat). [19.]

Tuottovaikutus	Tuotto kuukaudessa	Huomioitavaa
Kuormansiirron hyöty	+ 21,85 €/kk	vaihteluväli 0,14 €/kk— 36,241 €/kk
Akkureservihyvitys	+ 50 €/kk	arvio keskimääräisestä tuotosta
Aurinkopaneelien tuoton varastointi	+ 18 €/kk	tuotto riippuu sähkön hinnasta sekä paneelien tuotosta
Aurinkopaneelin hybridi- invertteri	+ 15 €/kk	laskelma 10 vuoden käyttöajalla ja 1 800 € hankintahinnalla
Laitteiston kustannus	–69,99 €/kk	kokonaishinta 8 398,8 €
Kokonaistuotto	= 29,86 €/kk	vuosituotto noin 360 €

Kuormansiirron vaihteluvälin vaikutus kokonaistuottoon vuodessa on alhaisimmalla tuotto-odotuksella noin –260 euroa ja korkeimmalla tuotto-odotuksella noin +770 euroa. Myös aurinkopaneeleista saatava hyöty sekä sähkön markkinahinta vaikuttavat vuosituottoon oleellisesti. Aurinkopaneeleista saatava vuosituotto on noin +400 euroa. Jos aurinkopaneelien tuotot jätetään huomiotta jää vuosituotoksi akkujärjestelmän osalta noin –40 euroa. Kuormansiirron vaihteluvälin vaikutus vuosituottoon on suuri.

Taulukossa 3 on esimerkkilaskelma 28 kW:n akkujärjestelmästä yli 200 m²:n kohteessa, jossa on myös aurinkopaneelit. Laskelmassa on huomioitu halpojen tuntien hyödyntäminen, aurinkopaneeleista saatava hyöty sekä akkujärjestelmän hankintahinta.

Taulukko 3. Esimerkkilaskelma 28 kW:n järjestelmä, jonka vuosikulutus on yli 20 000 kWh. Tyypillisesti yli 200 m²:n rakennus (muokattu lähteestä Elisa Oyj esimerkkilaskelmat). [19.]

Tuottovaikutus	Tuotto kuukaudessa	Huomioitavaa
Kuormansiirron hyöty	+ 27,83 €/kk	vaihteluväli 0,12 €/kk— 86,27 €/kk
Akkureservihyvitys	+ 60 €/kk	arvio keskimääräisestä tuotosta
Aurinkopaneelien tuoton varastointi	+ 20 €/kk	tuotto riippuu sähkön hinnasta sekä paneelien tuotosta
Aurinkopaneelin hybridi- invertteri	+ 15 €/kk	laskelma 10 vuoden käyttöajalla ja 1 800 € hankintahinnalla
Laitteiston kustannus	−94,99 €/kk	kokonaishinta 11 398,8 €
Kokonaistuotto	= 27,84 €/kk	vuosituotto noin 335 €

Kuormansiirron vaihteluvälin vaikutus kokonaistuottoon vuodessa on alhaisimmalla tuotto-odotuksella noin −330 euroa ja korkeimmalla tuotto-odotuksella noin +700 euroa. Myös aurinkopaneeleista saatava hyöty sekä sähkön markkinahinta vaikuttavat vuosituottoon oleellisesti. Aurinkopaneeleista saatava vuosituotto on noin +420 euroa. Jos aurinkopaneelien tuotot jätetään huomiotta, jää vuosituotoksi akkujärjestelmän osalta noin −85 euroa. Kuormansiirron vaihteluvälin vaikutus vuosituottoon on suuri.

4.3 Akkujärjestelmien rooli sähköverkon joustavuuden ja vakauden ylläpidossa

Tuulisina ja aurinkoisina päivinä sähkö on tyypillisesti halvinta suuren tuulivoiman ja aurinkosähkön tuotannon ansiosta. Ajoittamalla sähkön oston ja akuston latauksen tähän hetkeen voi osaltaan tasapainottaa sähköverkkoa sekä vähentää sähkön tuotannon hiilidioksidipäästöjä. Akkujärjestelmään varastoituneen sähkön käyttö sähköverkon sijaan silloin, kun sähkön hinta on korkea, tukee myös sähköverkon tasapainoa. [6.]

5 Kehitystarpeet ja tulevaisuuden näkymät

5.1 Kotitalouksien akkujärjestelmien kehitystarpeet

Akkujärjestelmien houkuttelevuuden lisäämiseksi on parannettava energiatehokkuutta ja alennettava laitteiston kustannuksia. Laitteiston helppokäyttöisyys on myös merkittävä tekijä. Lisäksi säätelyllä voidaan vaikuttaa akkujärjestelmien toimintaan osana sähköverkkoa. Nämä tekijät ovat ratkaisevia, jotta akkujärjestelmät voisivat tarjota taloudellisesti ja teknisesti kestäviä ratkaisuja.

Akkujärjestelmän energiatehokkuuden parantaminen ja elinkaaren pidentäminen ovat keskeisiä tekijöitä akkuteknologian kehittämisessä. Tarvitaan investointeja uusiin akkukemioihin, kuten kiinteän olomuodon akkuihin ja kierrätettäviin akkukemikaaleihin, jotka voivat pidentää akkujen kestoikää ja pienentää niiden hiilijalanjälkeä. Lisäksi akunhallintajärjestelmien kehittäminen mahdollistaa tehokkaamman latauksen ja purkamisen, mikä parantaa järjestelmän energiatehokkuutta. Virtuaalisesti yhteen liitetyt kotitalouksien akkujärjestelmät avaavat uuden tavan osallistua sähkömarkkinoille. Näin voidaan myös tasapainottaa sähköverkkoa.

Yksi suurimmista esteistä akkujärjestelmien yleistymiselle on niiden korkea hinta. Alkuinvestoinnit ovat monille kotitalouksille liian suuria, vaikka pitkän aikavälin säästöt olisivat mahdollisia. Akkutuotannon kasvattaminen voisi tuoda mitatakaavaetua. Uusien edullisempien materiaalien käyttö akuissa vaikuttaisi myös niiden hintaan. Valtion tukijärjestelmät ja verokannustimet voisivat nopeuttaa järjestelmien käyttöönottoa.

Eryityisesti teknisten laitteiden helppokäyttöisyys ja käyttäjäystävällisyys ovat keskeisiä tekijöitä niiden tiellä koko kansan suosikeiksi. Intuiitiiviset mobiili- ja verkkosovellukset, jotka tarjoavat selkeän ja helppokäyttöisen alustan akkujärjestelmän hallintaan ja reaaliaikaiseen seurantaan, ovat tärkeitä. Myös etähallintaominaisuudet, kuten lataustason seuranta ja akuston toiminnan optimointi lisäävät hallinnan tunnetta.

Säätelyllä ja standardoinnilla voidaan vaikuttaa akkujärjestelmien yleistymiseen. Säätelyllä voidaan vaikuttaa kotitalouksien mahdollisuuksiin osallistua reservimarkkinoiden toimintaan. Standardoinnilla on mahdollista varmistaa akkujärjestelmien yhteensopivuus. Kansainväliset standardit, jotka huomioivat tekniset vaatimukset ja turvallisuusvaatimukset, mahdollistavat mutkattomamman globaalin kaupankäynnin johtaen väistämättä tuotteiden kehittymiseen sekä hintojen alentumiseen.

5.2 Tulevaisuuden näkymät

Yksi merkittävä tekijä akkujärjestelmien yleistymiseen kotitalouksissa on niiden hankintahinta. Kuten luvussa 2 todettiin, litiumioniakkujen hinnat ovat tippuneet roimasti viimeisen vuosikymmenen aikana ja suunta näyttää edelleen alaspäin. Yksi hintaan alentavasti vaikuttava tekijä voisi olla akkujen suurempi kierrätysaste, toinen uusien tehokkaampien akkukemioiden kehittäminen.

Tällä hetkellä litiumioniakuista kierrätetään Suomessa vain vähän verrattuna esimerkiksi lyijyakkuihin. Lyijyakkujen kierrätysaste on yli 80 %. Tämä johtuu osittain hyvin pienestä litiumin määrästä akkua kohden sekä litiumin halvasta hinnasta. Litiumioniakussa on litiumia vain muutama prosentti. Raaka-aineiden hinnan nousu, sekä poliittinen paine kierrätyksen tehostamiseen akkujen määrän kasvun ohella, voivat saada muutoksen aikaan. [2, s. 130–131.]

Yksi lupaava akkukemia on litiumrikkiakku (Li-S), jonka teoreettinen energiatiheys on neljä kertaa litiumioniakkua korkeampi. Litiumrikkiakku on litiumioniakkua halvempi, ympäristöystävällisempi sekä kevyempi. Kuitenkin tällä hetkellä litiumrikkiakun käytännön energiatiheys ei yllä teoreettisiin lukemiin. Tämän akkukemian ongelmana on rikin määrän kasvu litiumin elektrodiin liittämisen aikana. [20, s. 8–9.]

Toinen lupaava akkuteknologia on kiinteäelektrolyyttinen akku eli niin sanotusti solid-state-akku. Se on litiumioniakkua nopeampi ladata. Kiinteäelektrolyyttisen akun energiatiheys on myös litiumioniakkua suurempi, ja sitä on myös

turvallisempi käyttää, jos akkuun kohdistuu iskuja. Kiinteä elektrolyytti säilyttää muotonsa paremmin iskujen aikana, kun taas nestemäinen elektrolyytti vuotaa herkemmin. Kiinteä elektrolyytti kestää myös paremmin tärinää ja lämpöä. Kiinteäelektrolyyttinen akku ei sovellu hyvin alhaisiin lämpötiloihin. [20, s. 8–9.]

6 Yhteenveto

Akkujärjestelmien yleistyminen kotitalouksissa on osa laajempaa siirtymää kohti hajautettua energiantuotantoa ja älykkäämpiä sähköverkoja. Akkujärjestelmien peruseräiteiden ymmärtäminen onkin olennaista hankinnan järkevyyden arvioimiseksi. Akkujen keskeisiä ominaisuuksia ovat energiatiheys, joka määrittää akun käyttöajan suhteessa sen kokoon, kuormitusjaksojen määrä eli syklit, jotka kertovat akun lataus- ja purkukertojen määrän, sekä purkaantumissyvyys, joka kuvaa akun käytettävissä olevan kapasiteetin. Kotitalouksissa yleisimmin käytetyt litiumrautafosfaattiakut (LFP) tarjoavat hyvän kompromissin turvallisuuden, käyttöiän ja hinnan välillä. Akkujärjestelmän toimintaan tarvitaan lisäksi invertteri, joka muuntaa tasajännitteen vaihtojännitteeksi ja päinvastoin, sekä akunhallintajärjestelmä (BMS), joka varmistaa akun turvallisen ja tehokkaan toiminnan.

Yksi akkujärjestelmien potentiaalisista hyödyntämiskohteista on osallistuminen sähköjärjestelmän reservimarkkinoille. Yksittäiset kotitaloudet eivät kuitenkaan voi suoraan osallistua näille markkinoille, vaan tarvitaan aggregaattori, joka yhdistää useita akkujärjestelmiä suuremmaksi kokonaisuudeksi. Nämä reservitoimittajat voivat tarjota säätökapasiteettia kantaverkkoyhtiö Fingridille. Kotitaloudet solmivat sopimuksen akkujärjestelmän käytöstä reservimarkkinoilla reservitoimittajan kanssa. Kotitalouksien kannalta olennaisia reservituotteita ovat tällä hetkellä taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D), taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja nopea taajuusreservi (FFR). Reservimarkkinoilta saatavat tulot voivat parantaa akkujärjestelmän taloudellista kannattavuutta, mutta niiden osuus kokonaistuotosta jää usein vähäiseksi.

Akkujärjestelmän hankinnan taloudellinen kannattavuus riippuu monista tekijöistä, joista tärkeimpiä ovat hankintahinta, akkujärjestelmän koko,

reservitoimittajan kanssa solmittu sopimus, sähkön markkinahinta ja sen vaihtelut, aurinkopaneelien olemassaolo ja niiden tuotto sekä kuormansiirron hyöty. Esimerkkilaskelmista voidaan päätellä, että aurinkopaneelien yhdistäminen akkujärjestelmään parantaa merkittävästi taloudellista kannattavuutta. Ilman aurinkopaneeleita on todennäköistä, että vuosituotto jää negatiiviseksi. Laskelmissa ei ole otettu huomioon aurinkopaneelien hankintakuluja. Kuormansiirron hyödyntäminen eli halvan sähkön lataaminen akkuun ja kalliin sähkön välttäminen on myös merkittävä tekijä. Sähkön hinnan vaihtelut ja kuormansiirron onnistuminen vaikuttavat siten merkittävästi akkujärjestelmän taloudelliseen kannattavuuteen.

Edellä mainituilla tekijöillä on merkittävä vaikutus investoinnin takaisinmaksu-aikaan. Ilman aurinkopaneeleita takaisinmaksuaika on todennäköisesti erittäin pitkä, ellei sähkön hinta pysy poikkeuksellisen korkealla. Tällöin investointi jäisi todennäköisesti tappiolliseksi. Aurinkopaneelien kanssa takaisinmaksuaika lyhenee huomattavasti, mutta se on silti usein useita vuosia. On tärkeää huomioida, että esimerkkilaskelmissa on paljon arvioituja tuottoja ja laajoja vaihteluvälejä. Tämän vuoksi niitä tulisi tulkita vain suuntaa antavina arvioina ja todelliset tulot voivat poiketa niistä merkittävästi. Laskelmissa on myös huomioitava kaikki kulut, kuten siirtomaksut, verot ja mahdolliset huoltokustannukset.

Akkujärjestelmän hankinta voi olla järkevää tietyissä olosuhteissa. Erityisesti kotitalouksissa, joissa on jo aurinkopaneelit, akkujärjestelmä voi parantaa omavaraisuutta, optimoida sähkönkäyttöä ja mahdollisesti tuottaa pientä taloudellista hyötyä osallistumalla reservimarkkinoille. Ilman aurinkopaneeleita akkujärjestelmän hankintaa on syytä harkita tarkkaan etenkin, jos tavoitteena on taloudellisesti järkevä investointi. Ennen hankintapäätöstä onkin tärkeää tehdä perusteellinen analyysi, ottaa huomioon kaikki olennaiset tekijät ja vertailla eri vaihtoehtoja. Myös akkujärjestelmien kehitysnäkymät, kuten akkujen hintojen lasku ja uusien akkuteknologioiden kehittyminen, on syytä ottaa huomioon pitkän aikavälin suunnittelussa.

Lähteet

- 1 Kähönen, Patrik. 2024. Sähköakkuenergiavarastot sähkömarkkinoilla. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. LUT-pub-julkaisuarkisto.
- 2 Minkkinen, Erkki. 2021. Akkuvaraston hyödyntäminen ja kannattavuus sähköjakeluverkossa. Diplomityö. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto LUT. LUTpub-julkaisuarkisto.
- 3 Battery Market Size, Share & Trends Analysis Report By Material (Lead Acid, Lithium Ion, Nickel-based, Sodium-ion, Flow Battery), End-use (Aerospace, Automobile, Consumer Electronics, Telecom), By Application, By Type, By Region, And Segment Forecasts, 2025 – 2030. Verkkoaineisto. Grand View Research. <<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/battery-market>>. Luettu 16.1.2025.
- 4 Catsaros, Oktavia. 2023. BloombergNEF's annual battery price survey finds a 14% drop from 2022 to 2023. Verkkoaineisto. BloombergNEF. <<https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>>. 26.10.2023. Luettu 16.1.2025.
- 5 Linja-aho, Vesa. 2022. Litiumioniakkutekniikka. Rakenne – ominaisuudet – turvallisuus. Tervakoski: Suomen Autoteknillinen Liitto.
- 6 Kotiakun lataus ja purku. Verkkoaineisto. Elisa Oyj. <<https://elisa.fi/kotiakku/lataus-ja-purku/>>. Luettu 14.1.2025.
- 7 Tienaa passiivista tuloa akkujärjestelmällä ja pienennä sähkölaskua. Verkkoaineisto. Emaldo. <<https://energiamyyni.fi/akkujarjestelma/>>. Luettu 14.1.2025.
- 8 Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>>. Luettu 10.1.2025.
- 9 Reservimarkkinat. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservivelvoitteet-ja-hankintakanavat>>. Luettu 10.1.2025.
- 10 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/#tekniset-vaatimukset>>. Luettu 10.1.2025.

- 11 Nopea taajuusreservi (FRR). Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/#tekni-set-vaatimukset>>. Luettu 10.1.2025.
- 12 Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR). Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/>>. Luettu 11.1.2025.
- 13 Säätosähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (mFRR). Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/#saatosahkon-hinnoitelu>>. Luettu 11.1.2025.
- 14 Reservimarkkinakoulutus. 2024. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinakoulutus-2024.pdf>>.2.10.2024. Luettu 20.1.2025.
- 15 Kotitaloudet sähkön reservimarkkinoilla. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sivut/yhtio/kuluttajatietoa/kotitaloudet-sahkon-reservimarkkinoilla/>>. Luettu 9.1.2025.
- 16 Itsenäinen aggregointi. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/itsenainen-aggregointi/>>. Luettu 15.1.2025.
- 17 Reservitoimittajat ja heidän toimittamansa reservituotteet. Verkkoaineisto. Fingrid. <<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinatoimijat.pdf>>. Päivitetty 20.12.2024. Luettu 10.1.2025.
- 18 Emaldon akkujärjestelmän hyödyt. Verkkoaineisto. Emaldo. <<https://energiamyynnti.fi/akkujarjestelma/>>. Luettu 13.1.2025.
- 19 Paljonko voit säästää Elisa Kotiakulla? (Esimerkkilaskelmat). Verkkoaineisto. Elisa Oyj. <<https://elisa.fi/kotiakku/#faq-saasto>>. Luettu 13.1.2025.
- 20 Sipiläinen, Joonas. 2023. Sähköauton korkeajänniteakku: kierrätysmetallit ja raaka-aineet. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. LUTpub-julkaisuarkisto.