



Lari Koskinen

Akkukäyttöisten sähkövarastojen (BESS) tekniikat ja markkinatilanne

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

30.5.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Lari Koskinen
Otsikko:	Akkukäyttöisten energiavarastojen (BESS) tekniikat ja markkinatilanne
Sivumäärä:	43 sivua + 1 liitettä
Aika:	30.5.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Automaatiotekniikka
Ohjaaja:	Lehtori Reijo Leinonen Liiketoiminnan kehitysjohtaja Niklas Enkvist

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia liike- ja teollisuuskiinteistöihin asennettavien akkukäyttöisten sähkövarastojen tekniikoita ja markkinatilannetta Suomessa. Tavoitteena oli kehittää toimeksiantajayrityksen tietoisuutta sähkövarastoista, ja saada näyttöä laitteistoiden kannattavuudesta taloudellisesti. Opinnäytetyön toimeksiantaja oli UTU Oy.

Työssä aluksi kerrotaan yleisesti sähkövarastoista ja niiden komponenteista, pääpainona akkuteknologia. Tämän jälkeen tarkastelun kohteena on taloudellinen osio, jossa avataan erilaisia säästöjen ja tulojen kohteita. Lopuksi nykyisiä ja tulevia markkinoiden suuntia pohdittiin ja sähkövarastojen myyntiä yhteensovitettiin UTU Oy:n muuhun tuotevalikoimaan.

Opinnäytetyötä varten tietoa haettiin kirjallisuudesta, tutkimustuloksista, internetartikkeleista ja omakohtaisista kenttähaastatteluista. Tiedonhaun pääkohteina olivat kohdalaisen uudet tutkimukset, sillä akkuteknologian kehittyessä tutkimustieto vanhenee nopeasti.

Työn tuloksena saatiin koottua suuri määrä tietämystä sähkövarastojen vaatimuksista, nykyisestä tilanteesta ja tulevaisuuden kehityksen suunnasta. Nämä tiedot yhdistettynä aiempaan ammatilliseen osaamiseen auttavat ohjaamaan liiketoiminnan kehitystä yhtiössä sähkövarastojen osalta.

Avainsanat: Energiavarasto, sähkövarasto, akku, BESS

Abstract

Author: Lari Koskinen
Title: Battery Energy Storage System Technologies and Their Market Situations
Number of Pages: 43 pages + 1 appendix
Date: 30 May 2023

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation engineering
Professional Major: Automation engineering
Supervisors: Reijo Leinonen, Senior Lecturer
Niklas Enkvist, Business Development Director

The purpose of the thesis work was to investigate the technologies and market situation of Finnish battery energy storage systems, sized to be installed in commercial and industrial properties. The aim of the study was to increase the situational awareness regarding BESS's for the company commissioning the thesis work. Alongside this, the aim was to provide evidence of the economic viability of the systems. The company commissioning the thesis was UTU Oy.

The thesis first provides an overview of battery energy storage systems and their components, with a focus on battery technologies. The economic section then examines various areas of savings and revenue. Finally, current, and future market trends are discussed, and the possible sale of BESS's integrated into UTU Oy's other product range is explored.

Information for the thesis was gathered from literature, research results, internet articles and personal field interviews. The main scope of interpreted information was on relatively new research because data regarding battery technology becomes quickly outdated.

The result of the work is a significant amount of information about the requirements of BESS's, along with an insight about the direction of future development. Combining this information with previous professional expertise will help guide business operations concerning energy storage systems.

Keywords: Energy storage, battery energy storage, battery, BESS

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Akkukäyttöisen energiavaraston toiminta	2
2.1	Yleisrakenne	5
2.2	Elektroniikkaosat	7
2.3	Akut	9
2.3.1	Lyijyakku	12
2.3.2	Natriumioniakku	13
2.3.3	Kiinteäelektrolyyttinen akku	14
2.3.4	Litiumioniakku	14
2.4	Ohjausohjelmisto	16
3	Energiavarasto investointina	17
3.1	Säästökohteet	17
3.1.1	Kulutushuippujen leikkaaminen eli peak shaving	18
3.1.2	Kuorman siirto eli load shifting	20
3.2	Kaupan käyminen sähkövarastolla	21
3.2.1	Sähkön osto ja myynti	21
3.2.2	Reservimarkkinat	21
3.3	Takaisinmaksuaika	27
3.3.1	Käyttöikä	30
4	Järjestelmä myynnillisesti	31
4.1	Nykyinen markkinatilanne ja toimijat	31
4.2	Yhdistäminen UTU Oy:n muiden tuotteiden kanssa	32
5	Tulevaisuuden näkymät Suomessa	34
6	Yhteenveto	36
	Lähteet	38
	Liitteet	

Liite 1: Sähkön kulutus ja tuotanto Suomessa megawattitunteina tunnissa,
tammikuu 2023

Lyhenteet

- ESS: *Energy storage system*. Energiavarasto. Ylimääräinen energian tai sähkön tuotanto voidaan varastoida tällaiseen järjestelmään myöhempää käyttöä varten.
- BESS: *Battery energy storage system*. Energiavarasto, joka perustuu sähkön varastointiin sähkökemiallisessa muodossa akkuihin.
- UPS: *Uninterruptible Power Supply*. Sähkölaite, joka käyttää akkuja tuottaakseen sähkövirtaa sen perään kytketyille laitteille sähkökatkojen sattuessa.
- W: Watti. Tehon yksikkö. Sähkölaitteiden teho ilmoitetaan yleisesti watteina. Yksi watti vastaa kuorman yli vaikuttavaa voltin jännitettä ja ampeerin virtaa. Käytössä usein myös kilowatti kW (10^3 W), joka tarkoittaa tuhatta wattia, ja megawatti MW (10^6 W), joka tarkoittaa miljoonaa wattia.
- Wh: Wattitunti. Energian yksikkö, joka vastaa tunnin ajan käytettävää wattien tehoa. Sähköenergian yhteydessä käytetään usein yksikkönä kilowattituntia kWh (10^3 Wh), joka tarkoittaa tuhatta wattituntia. Käytössä myös megawattitunti MWh (10^6 Wh), joka tarkoittaa miljoonaa wattituntia.
- IEA: *International Energy Agency*. Maailmanlaajuinen yhdistys, joka tuottaa dataa energian tuotannosta ja kulutuksesta.
- DC: *Direct Current*. Tasavirta. Sähkövirran muoto, joka siirtyy vain yhteen suuntaan.
- AC: *Alternating Current*. Vaihtovirta. Sähkövirran muoto, jossa suunta vaihtuu jatkuvasti.

- EASE: *European Association for Storage of Energy*. Järjestö, joka tutkii ja rahoittaa sähkövarastoihin liittyviä tutkimuksia Euroopassa.
- EERA: *European Energy Research Alliance*. Järjestö, joka tutkii ja rahoittaa Euroopan unionin mukaisia energiapolitiikan tutkimuksia.
- AGM: *Absorbent Glass Mat*. Lyijyakku, jossa akun sisällä oleva happo on imeytetty ohuisiin lasikuitumattoihin.
- BMS: *Battery Management System*. Elektroninen järjestelmä, joka ohjaa ladattavien akkujen latausta ja purkua.
- Hz: Hertsi. Taajuuden yksikkö SI-järjestelmässä. Vaihtosähkö vaihtaa suuntaa, ja sen sinimuotoinen taajuus ilmoitetaan hertseinä.

1 Johdanto

Sähkön käyttö kasvaa ja sen käyttökohteet muuttuvat jatkuvasti. Opinnäytetyön kirjoitusvaiheessa on ollut ajankohtaisena aiheena mahdolliset sähkökatkokset ja koko sähköverkon mahdollinen riittämättömyys poikkeustilanteissa. Vihreä siirtymä, joka tällä hetkellä kohdistuu sähköautoihin ja uusiutuviin sähköntuotannon keinoihin, voi aiheuttaa uudenlaisia rasitteita sähköverkkoomme. Verkon siirtyessä yhä enemmän tuuli- ja aurinkosähkön hyödyntämiseen, sään muutokset lisäävät vaihtelua sähkön kulutukseen ja tuotantoon entistä enemmän. Energiavarastoja lisäämällä mahdollisia verkon heittelyjä ja luotettavuutta voitaisiin paikata.

Energiavarastot eli ESS:t (*Energy Storage System*) ovat järjestelmiä, joihin energiaa voidaan varastoida. Energian varastointi voidaan jakaa karkeasti pitkäaikaiseen ja lyhytaikaiseen varastointiin. Pitkäaikaisen energiavaraston esimerkkinä voidaan pitää pumppauslaitaita ja vesivoimaa. Tällöin vettä pumpataan vesivoimalan yllä olevaan altaaseen, josta sen potentiaalienergiaa voidaan myöhemmin hyödyntää voimalassa, ja luoda sähköä pyörittämällä voimalan turbiineita. Näin ylimääräinen energia saadaan varastoitua pitkäksikin aikaa. [1.]

Energian tuotanto ja varastointi täytyy suunnitella myös vuorokauden sisäisten vaihteluiden tarpeisiin. Lyhytaikaisena varastointina ja sähkön kulutuksen säätönä voidaan pitää esimerkiksi lämpövoimalaitoksissa syntyvää lauhdevoimaa ja sähkövarastoja. Sähkövarastot taas voidaan jakaa edelleen kondensaattori- ja akkuteknologioihin pohjautuviin sähkövarastoihin. Lauhdesähkön tuotannon kapasiteetti on näistä edellä mainituista nopeasti laskenut sen aiheuttamien päästöjen ja taloudellisen kannattamattomuuden takia. Tarve lyhytaikaiselle varastoinnille ja nopealle tuotannolle on kuitenkin pysynyt samana, ja akkukäyttöiset energiavarastot voivat olla varteenotettavia korvaajia. [1; 2.]

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkia markkinoilla olevia akkutoimisia sähkövarastotekniikoita, purkaa niiden rakennetta eri osiin ja tutkia näitä osia tarkemmin

nykyhetken ja tulevaisuuden osalta. Lisäksi työssä perehdytään mahdollisiin tuottoihin energiavaraston ollessa mahdollinen investointikohde hankinnoista kiinnostuneille asiakkaille. Lopuksi työssä pohditaan tulevaisuuden näkymää näiden akkukäyttöisten energiavarastojen tai BESS:ien (*Battery Energy Storage System*) osalta Suomessa. Opinnäytetyö on rajattu vain akkuteknologiaan perustuviin sähkövarastoihin. Siksi tekstissä viitataan termillä ”sähkövarasto” näihin akkupohjaisiin laitteisiin. Näin ollen tämän työn tarkastelualueesta rajataan ulos kondensaattori- ja superkondensaattoritoimiset energiavarastot.

Omakohtaisten haastatteluiden ja tiedusteluiden perusteella sähkövarastojen markkinoilla on monia kilpailevia toimijoita, mutta teknologian ollessa yhä murrosvaiheessa hakevat ne vielä omaa jalansijaansa uudella toimialueella. Tarkastelu on rajattu pääasiassa kiinteistökokoisiiin laitteisiin, joita voidaan asentaa liiketiloihin, teollisuuden rakennuksiin ja julkisiin tiloihin. Pääasiallisen tarkastelun ulkopuolelle siis jätetään pienet, esimerkiksi omakotitalokäyttöiset, mutta myös isot, voimalaitoskaalalla rakennettavat sähkövarastot. Rajaus on tehty opinnäytetyön toimeksiantajan, UTU Oy:n tarpeiden perusteella.

UTU Oy on suomalainen sähköalan yritys, joka kuuluu UTU-konserniin. Konserni toimii Suomessa, Norjassa ja Baltian maissa, ja saavutti 55 miljoonan euron liikevaihdon vuonna 2022. UTU Oy:n valikoimaan kuuluvat laajat sähköistuksen ja sähköjakelun tuotteet niin muuntamoiden, sähköautojen latauksen kuin komponenttien saralla. Lisäksi tuotteistoon kuuluvat edustukset UPS-laitteissa (*Uninterruptible Power Supply*) ja loissähkön kompensoinnissa. Mahdolliset uudet sähkövarastojen ja aurinkovoimajärjestelmien tuotealueet ovat tällä hetkellä tarkastelun alla, ja pitkä kokemus UPS-laitteista mahdollistaa saumattoman siirtymisen energiavarastojen kanssa toimimiseen tulevaisuudessa.

2 Akkukäyttöisen energiavaraston toiminta

Sähkövarastoista ja sähköntuotannosta puhuttaessa käytetään tuotannon terminä kapasiteettia. Kapasiteetti kertoo suurimman mahdollisen tehon, jonka tuotantolaitos tai varasto pystyy tuottamaan. Kapasiteetti ilmoitetaan watteina

tai sen kerrannaisyksikköinä kilo- tai megawatteina. Varastoitavan tai tuotetun energian määrä ilmoitetaan wattitunteina tai usein sen kerrannaisyksikköinä kilo- tai megawattitunteina. Kilowattitunneista puhutaan usein myös käytetyn tai tuotetun sähkön määrän yhteydessä. Yksi kilowattitunti tarkoittaa sitä määrää energiaa, jota tarvitaan tuhannen watin jatkuvan tehon ylläpitoon tunnin ajaksi. On tärkeää huomioida, että kapasiteetti-sanaa käytetään useasti virheellisesti arkikielessä tarkoittamaan varsinkin akkujen ja sähkön varastoinnin yhteydessä varastoitavan energian määrää. [3; 4.]

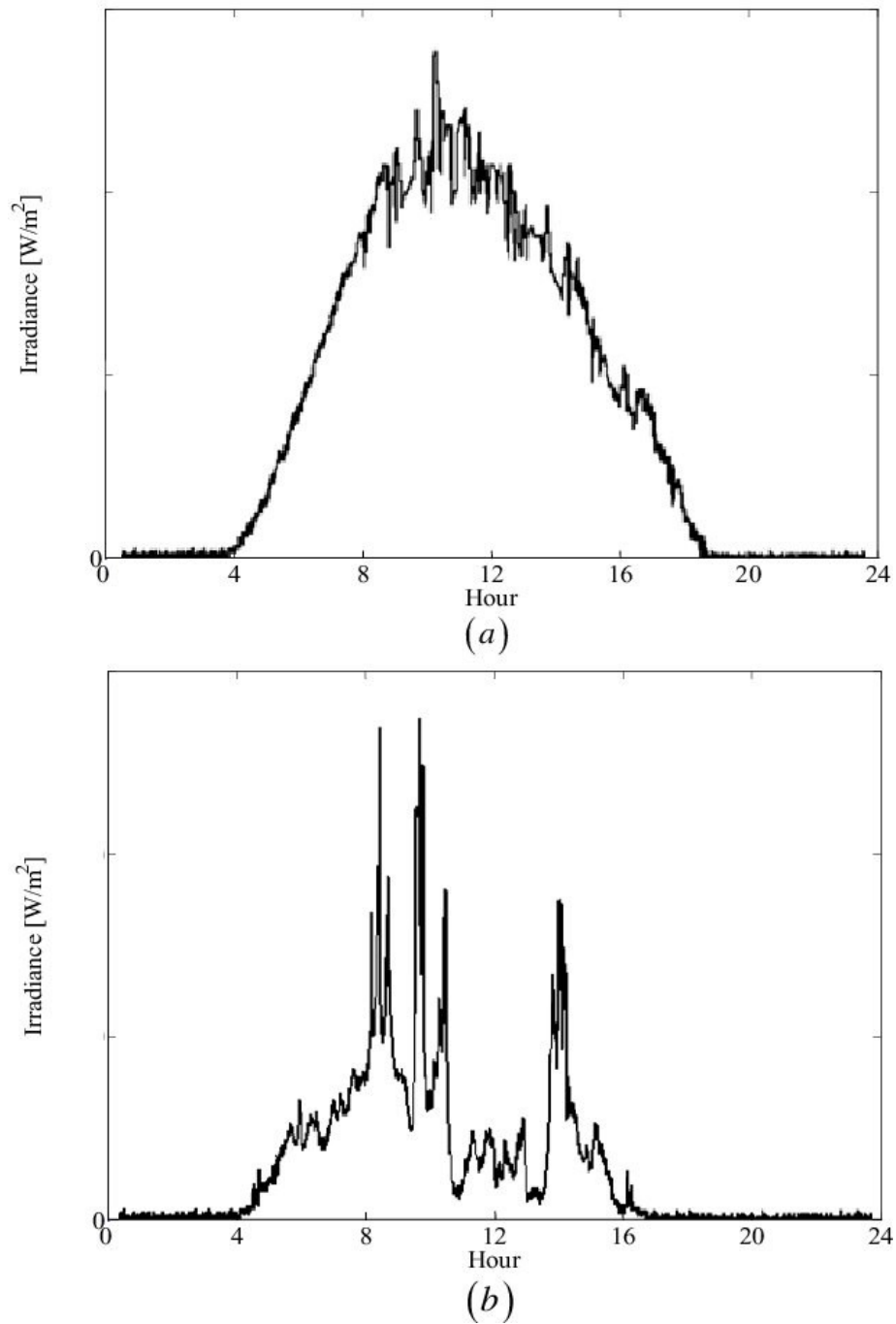
Akkukäyttöisten energiavarastojen yhteenlaskettu kapasiteetti on ollut maailmanlaajuisesti 16 gigawattia vuonna 2021. Kapasiteetin lisäyksen trendi on jyrkästi nouseva, sillä vuonna 2016 kapasiteetti on ollut 2 gigawattia. IEA:n (International Energy Agency) mukaan kapasiteetin pitäisi nousta 680 gigawattiin vuoteen 2030 mennessä, jotta olisimme edistymässä kohti hiilineutraalia vuotta 2050. Kasvuvauhti ei vielä ole siis riittävä tähän tarpeeseen. [5; 6.]

Sähkön tuotanto ja kulutus eivät verkkotasolla aina täsmää, joten tuotannon ollessa korkeammalla kuin kulutuksen, olisi tämä ylimääräinen sähkö hyvä varastoida myöhempää käyttöä varten. Kulutuksen ollessa korkeampaa kuin tuotanto voidaan varastoja tyhjentää. Esimerkiksi tammikuussa 2023 koko Suomen sähkön kulutuksen keskiarvo on ollut 10235 MWh tunnissa, kun taas sähkön tuotannon keskiarvo on ollut vain 9805 MWh tunnissa. Kun sähkön tuotannossa on vajetta tai ylijäämää, sähköä saadaan ostettua tai myytyä kansainvälisillä sähkömarkkinoilla. [7.]

Sähkön kulutus on Fingridin mukaan suurinta noin kello 7 ja kello 21 välillä. Yöaikaan kulutus on huomattavasti pienempää, mutta vastaavasti sähkön tuotantokin laskee öisin. Fingridin kaaviosta näkee myös, että sähkön tuotanto heittelee jatkuvasti, jonka perusteella energiavarasto voi olla järkevä ratkaisu tasoittamaan tuotannon ja kulutuksen eroja. [liite 1.]

Sähkövarastot ovat loistava yhdistelmä kiinteistön aurinkopaneelijärjestelmälle. Tällöin itse tuotettua aurinkosähköä voidaan hyödyntää omiin tarpeisiin, jopa

silloin kun tuotanto ylittää kulutuksen määrän. Kulutuksen ylittävä tuotettu sähkö voidaan varastoida ja käyttää myöhemmin, kun aurinkoenergian tuotto vähenee. Aurinkopaneelien yhteydessä energiavarastolla voidaan myös paikata sään muutoksien aiheuttamia muutoksia paneelien sähköntuotannossa. Kirkaassa säässä paneelien tuotanto on jatkuvaa ja ennalta arvattavaa, kun taas pilvisellä säällä aurinkopaneelien sähköntuotto voi vaihdella jatkuvasti (kuva 1, s. 5), joten sähkövaraston akuilla voidaan tasata kiinteistön sähkön tarpeita. [8.]

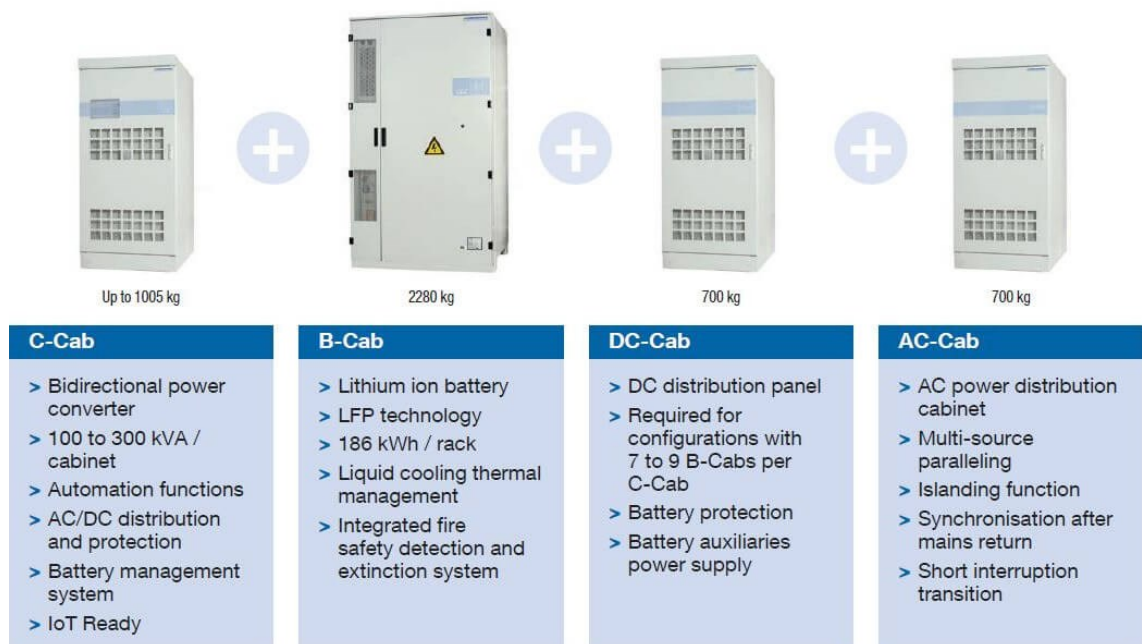


Kuva 1. Aurinkopaneeleille saatavan säteilytehon määrä (a) kirkaalla säällä (b) pilvisellä säällä. [9]

2.1 Yleisrakenne

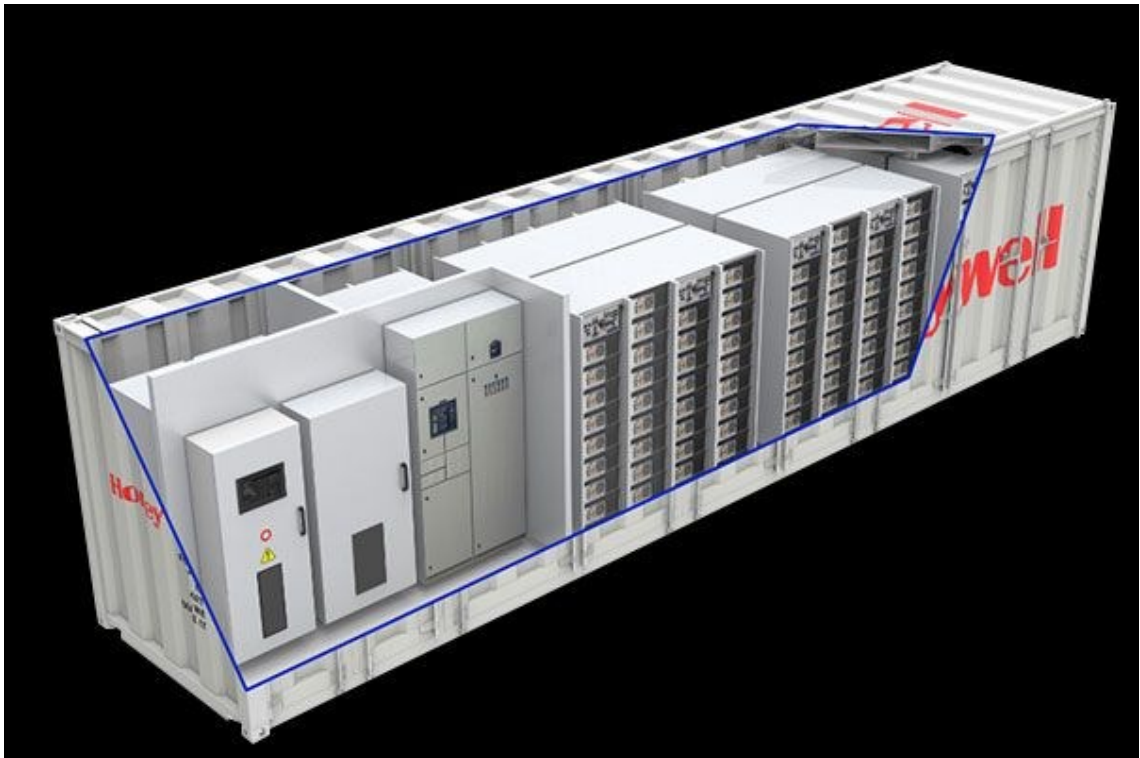
Perusrakenteeltaan sähkövarastot koostuvat muutamasta kohtuullisen yksinkertaisesta sähkötekniikan laittekokonaisuudesta. Yksinkertaistettuna

sähkövarastona voidaan pitää jopa yhtä akkua, mutta jotta voidaan puhua täydellisestä järjestelmästä, akku tarvitsee ympärilleen muitakin komponentteja. Fyysisesti valmiiseen laitteeseen kuuluvat akkujen lisäksi myös tehoelektronikan osat, joilla akkujen latausta ja purkua hallitaan yhdessä säätöohjelmiston kanssa. Monien valmistajien suurikokoiset sähkövarastot ovat rakenteeltaan modulaarisia, mikä tarkoittaa sitä, että eri komponentteja voidaan yksittäin lisätä. Esimerkkinä tästä on Socomec-valmistajan SUNSYS HES L -laitteisto (kuva 2), jossa valmis sähkövarasto kootaan komponenteista. Tällöin loppukäyttäjän tarpeisiin voidaan paremmin varautua ja ratkaisuja voidaan räätälöidä useampaan käyttökohteeseen. Näin sähkövaraston kapasiteetti ei aina ole suhteutettuna varastoitavan energian ja akkujen määrään, vaan näitä lukuja voidaan nostaa toisistaan sitoutumattomina. Modulaarisuus mahdollistaa myös järjestelmän skaalaamisen jälkikäteen moduulien lisähankinnoilla. Mikäli tehon tai akkujen määrä kasvaa esimerkiksi rakennuksen käyttöasteen tai lisärakentamisen myötä, voidaan komponentteja lisäämällä saada lisää kohdennettua hyötyä laitteelle. [10.]



Kuva 2. Socomec SUNSYS HES L -sähkövaraston eri komponentteja. [10]

Rakennusten sisätiloihin asennettavien sähkövarastojen osalta laitteet muistuttavat usein suuria sähkölaitteita tai -keskuksia. Ulos sijoitettavissa laitteissa sähkövarastojen valmistajat taas suosivat usein konttiratkaisuja, joissa sähkövarastot tai osia niistä rakennetaan konttien sisään tehtaalla (kuva 3). Rahtikontit on suunniteltu kestävämmän rankkoja olosuhteita, joten ne sopivat hyvin suojaamaan kriittisiä sähköosia sään muutoksilta. Rahtikontteihin asennettujen sähkövarastojen siirtäminen asennuspaikalle on myös logistisesti yksinkertaisempaa.



Kuva 3. Esimerkki Honeywellin konttiin valmistamasta sähkövarastojärjestelmästä. [11]

2.2 Elektroniikkaosat

Sähkövarastoissa energia varastoidaan akkuihin tasasähkönä eli DC-jännitteenä (*direct current*). Peruskäytössä olevat sähköverkkoon kytkettävät laitteet toimivat kuitenkin vaihtosähköä eli AC-jännitteenä (*alternating current*). Näin ollen verkosta saatava vaihtovirta täytyy muuttaa tasasähköksi, jotta se saadaan varastoitua akkuihin. Kun akustosta taasen halutaan purkaa sähköä takaisin laitteen kuormaksi liitetyille laitteille, tulee akkujen tasasähkö muuttaa

vaihtosähköksi. Nämä muunnokset toteutetaan tehoelektronikan komponenteilla, ja tarkemmin tasa- ja vaihtosuuntaajilla. Vaihtosuuntaajasta, eli tasasähköstä vaihtosähköä muuntavasta komponentista, käytetään myös usein termiä invertteri. [12.]

Jos sähkövarastolla tahdotaan osallistua kantaverkkoyhtiö Fingridin reservimarkkinoille, tulee tehoelektronikan kyetä luomaan oma taajuus ja säätämään itsenäisesti syöttämänsä tehoa. Jotkin laitteet eivät tähän kykene, vaan ainoastaan seuraavat verkossa jo ennalta olevaa taajuutta ja kytkeytyvät siihen seuraten ja syöttäen jännitettä samalla taajuudella. Reservimarkkinoilla Fingrid ei lähetä ohjaussignaaleja, vaan reservimarkkinoilla toimivan sähkövaraston tulee kyetä automaattisesti muuttamaan toimintaansa siihen kytketyn verkon taajuuden perusteella. [13.] Invertterin oma taajuuden luominen täytyy myös olla mahdollista, mikäli sähkövarastolla halutaan luoda oma mikroverkko. Tällä tarkoitetaan tilannetta, jossa sähkövaraston perässä oleva kuorma tai koko kiinteistö erotetaan verkosta täysin. Näin voi tapahtua esimerkiksi täyden sähkökatkon sattuessa, tai mikäli sähköverkkoa ei kohteeseen saada, esimerkiksi pitkän liityntämatkan takia.

Jotta sähkövarasto pystyy suunnittelemaan ja toteuttamaan saumattomasti kiinteistön sähkön kulutusta, täytyy sen pystyä mittaamaan myös kiinteistön energian kulutusta ja mahdollista omaa sähköntuotantoa. Näissä tapauksissa toteutuksena voidaan pitää liittymistä olemassa oleviin sähkömittareihin, tai toimittamalla oma mittausratkaisu osana sähkövarastokokonaisuutta. Haastateltu Cactus-sähkövarastoyhtiö kertoo käyttämänsä omaa mittaustaan sähkövaraston hallinnoinnissa.

Elektroniikkaosiin voidaan myös laskea sähkövaraston mahdolliset jäähdytysosat, paloturvallisuuslaitteet ja erinäiset anturit laitteiston tarkkailua varten. Esimerkiksi Socomecin valmiissa sähkövarastossa on nestejäähdytteinen lämmönhallintalaitteisto akuille ja lisäksi tulipalon sammutusjärjestelmä. Suurissa kontteihin rakennetuissa sähkövarastoissa on usein oma ilmastointijärjestelmänsä lämpötilan säätelyä varten. [10.]

2.3 Akut

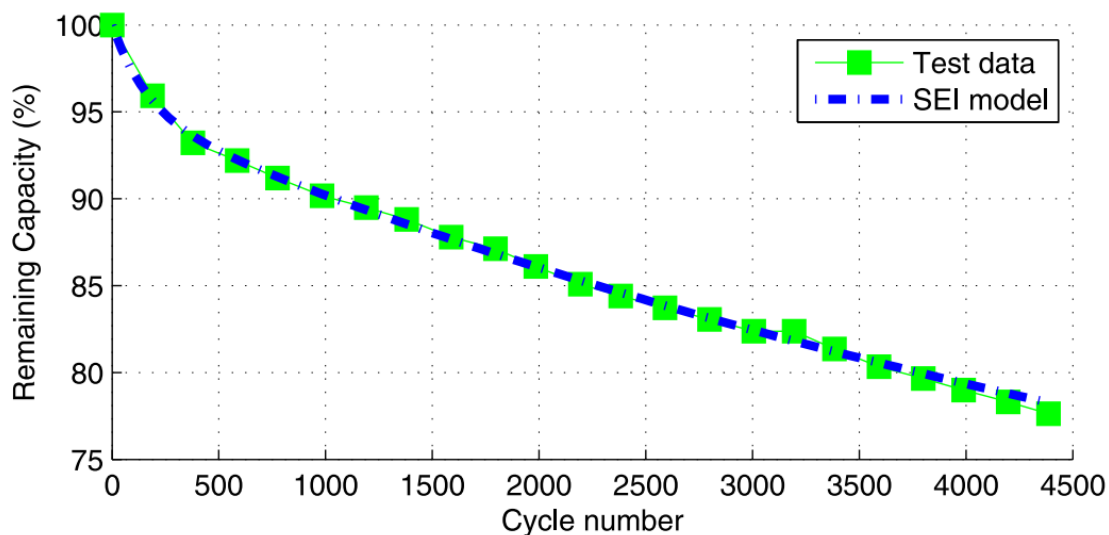
Akkukäyttöisissä energiavarastoissa energia varastoidaan akkuihin. Kuten aiemmin on kerrottu, akkujen toiminta perustuu tasasähköön. Yksi akku koostuu kahdesta tai useammasta akkukennosta, ja akkukennojen jännite vaihtelee yhdestä neljään volttiin. Akkukennoja voidaan ketjuttaa sarjaan, jolloin saadaan aikaan yksi iso akku ja näin korkeampi jännite akun napojen välillä. Kennoja voidaan myös ketjuttaa rinnan, jolloin varastoitavan energian määrä kasvaa. Tämän modulaarisen rakenteen ansiosta akkuja voidaan valmistaa moniin erilaisiin tarpeisiin. Akkuihin ei todellisuudessa varastoida sähköä, vaan elektronien virtaus aiheuttaa kemiallisia reaktioita akkukennon sisällä olevan anodin ja katodin välillä. Anodit, eli negatiiviset elektrodit, ja katodit, eli positiiviset elektrodit, ovat upotettuina akun rungon sisällä nestemäiseen tai kiinteään elektrolyyttiaineeseen, jonka läpi elektronit liikkuvat. Akun sisällä tapahtuva kemiallinen reaktio, ja siten sen tarkempi toimintaperiaate vaihtelee akun teknologian ja käytettyjen materiaalien mukaan. Akkujen hyötysuhde vaihtelee 70 ja 95 prosentin välillä. Hyötysuhde tarkoittaa akkuun ladatun ja siitä saatavan purettavan energiämäärän suhdetta. [14.]

Vuonna 2016 Yhdysvaltain energiaviraston arvioiden mukaan maailmanlaajuisesti akkukäyttöisten energiavarastojen tekniikat jakautuivat siten, että litiumioniakkuihin perustuvat laitteet vastasivat noin 69 prosentista kaikesta kapasiteetista. Natriumioniakkuiset laitteet olivat noin 13 prosenttia, lyijyakkulaitteet noin 7 prosenttia ja virtausakkulaitteet alle 5 prosenttia kaikesta kapasiteetista. Virtausakkujen tarkastelu rajataan niiden pienen käyttöasteen takia ulos työstä. [14.]

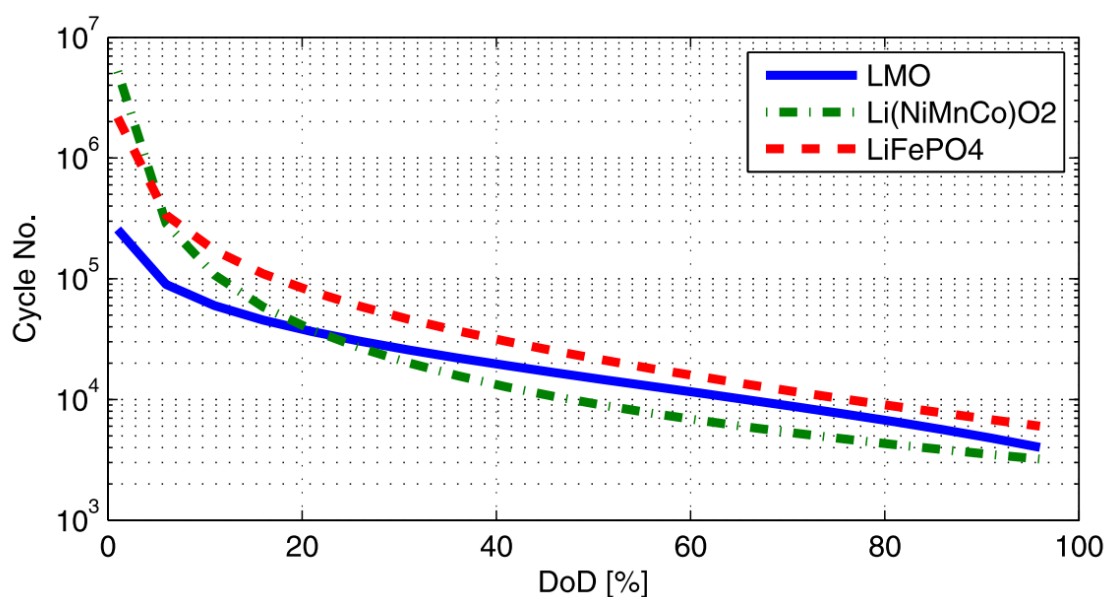
Suurien akkujen hinta lasketaan yleisesti kilowattituntia kohden, jolloin luvuista saadaan vertailukelpoisia eri akkuteknologioiden välillä. Eri kohteita verrattaessa on tärkeää tarkastella, otetaanko hinnoittelussa huomioon vain akkukennon vai koko sähkövaraston hinta. Vuonna 2018 tarkastellessa akkukennojen hintaa litiumionijärjestelmän osalta akuston hinta on lähteestä riippuen ollut noin 200–250 euroa kilowattituntia kohden, kun taas esimerkkinä Teslan Powerwall-

sähkövaraston osalta koko järjestelmän hinta on ollut 480 euroa kilowattituntia kohden. [1; 15.]

Akut ovat kuluvia osia, ja niiden käyttöikä vaihtelee käytetyn rakenteen ja teknologian mukaan. Akkujen käyttöikä voidaan mitata ja verrata usealla eri tavalla, esimerkiksi aikaan tai lataussykleihin pohjautuen. Yhdellä lataussyklillä tarkoitetaan akun lataamista tyhjästä täyteen ja sen tyhjentämistä uudelleen. Mitä useamman lataussyklin läpi akku käy (kuva 4), sitä vähemmän energiaa akkuun saadaan varastoitua. Monet akkuvalmistajat antavat ns. ”syklitakuun” numeroina. Esimerkkinä Cactos-sähkövaraston akuille annetaan syklitakuu, jossa valmistaja takaa akuille 80 % varastointikapasiteetin 6000 syklin jälkeen. Mitä syvemmän lataus- ja purkusyklin läpi akku käy (kuva 5, s. 11), sitä pienempi sykli-ikä sillä on. Jos akkua puretaan nollassolle tai lähelle sitä jatkuvasti, sykli-ikä voi vähentyä jopa 30 %. [16.] Lataussyklien määrästä on kuitenkin vaikeaa päätellä sähkövarastojen osalta täyttä kokonaisuutta, sillä akkujen varaukset voivat liikkua laajalla alueella, eikä niitä välttämättä ajeta aina tyhjästä täydeksi. [17.] Akuissa tapahtuvat kemialliset reaktiot voivat heikentyä käytön myötä tai ajan kuluessa, jopa silloin kun käyttö on vähäistä. Tätä tapahtumaa ja sen vaikutusta akun elinkaareen voidaan myös vertailla eri akkujen välillä, jolloin puhutaan itsetyhjenemisestä. [18.]



Kuva 4. Esimerkki akun kulumisesta lataussykliä jälkeen. Kuvaaja saatu matemaattisesta mallista. [16]



Kuva 5. Erilaisten litiumioniakkujen purkusyvyyden (DoD) vaikutus lataussykliä määrään. [16]

EASE (*European Association for Storage of Energy*) ja EERA (*European Energy Research Alliance*) ovat energiatehokkuutta ja vihreää siirtymää tutkivia tahoja ja ovat asettaneet vuonna 2017 eri akkuteknologioiden hinnalle ja käytöille tavoitteet perustuen vuoden 2011 Euroopan komission laskelmiin.

Tavoitteet eivät velvoita mihinkään, mutta niihin pääseminen vuoteen 2030 mennessä edistää hiilineutraaliuden tavoittelua Euroopassa, ja antaa suuntaa tulevaisuuden ennustamiselle akkuteknologiaan liittyen. [14.]

2.3.1 Lyijyakku

Lyijyhappoakkujen teknologia on keksitty jo vuonna 1860, joten niiden käyttökohteet ovat kulkeneet teollisuuden kanssa käsi kädessä. Lyijyakku-termin alla on laaja valikoima erilaisia rakenteita ja tarkempia periaatteita, mutta peruskäytössä lyijyakussa elektrolyytinä toimii laimennettu rikkihappoliuos. Niiden etuina toimivat laajat toimitusketjut, alhaiset hinnat, hyvät hyötysuhteet sekä kohtuullisen yksinkertaiset kierrätysmahdollisuudet käytetyille akuille. Heikkouksina voidaan pitää matalampaa energiatiheyttä ja teknologian lyhyttä sykli-ikää muihin akkuihin verrattuna. Lyijyakut myös luovat ilmaan vetykaasua käytön aikana, mikä voi aiheuttaa räjähdysvaaran ilman tarvittavaa ilmanvaihtoa. [19.]

Sähkövarastokäytössä ei voida käyttää yleisiä, kuluttajille tuttuja lyijyhappoakkuja, joissa sisällä on vapaasti liikkuvaa ja lisättävää akkuhappoa. Nämä akut kuluvat nopeasti, kun niitä puretaan tyhjäksi sisäisen rakenteensa takia. Elektronikkakohteissa, kuten UPS-laitteissa ja sähkövarastoissa, hyödynnetään usein suljettuja, huoltovapaita AGM-akkuja (*Absorbent Glass Mat*), jotka soveltuvat syväpurkauskäyttöön (deep cycle). AGM-teknologiassa akun (kuva 6, s. 13) sisällä oleva akkuhappo on imeytetty todella ohuisiin lasikuitumattoihin, jolloin akkuja voidaan pitää myös kyljellään ilman, että happo valuu ulos akusta. Akun sisällä syntyvät vetykaasut purkautuvat ulos kuoressa olevan venttiilin kautta, ja akun sisäisistä komponenteista on näkyvillä vain sen navat. [20.]



Kuva 6. Victron AGM -syväpurkausakku. [21]

EASE / EERA -tavoitteet lyijyakuille vuoteen 2030 mennessä ovat alle 100 €/kWh hinta akustoille ja käyttöikään perustuva tavoite, jonka pohjalta akustoon voidaan ladata yli 80 % alkuperäisestä energiasta 3000 syklin jälkeen. Vuoden 2017 luvut vastaavasti olivat alle 200 €/kWh ja 2000 sykliä. [14.]

Lyijyakkujen käyttö on sähkövarastojen ja muiden vastaavien suurien akkukoh- teiden osalta vähentymässä, sillä litiumioniakut ovat pitkäikäisempiä ja usein energiatehokkaampia.

2.3.2 Natriumioniakku

Natriumioniakut ovat yhä kehittyvää teknologiaa. Niiden toimintaperiaate on pit- kälti samankaltainen kuin litiumioniakuilla, mutta akuissa käytetään natriumia. Arkikielessä natriumioniakuista puhutaan myös suola-akkuina. Suola-akkujen etuina muihin akkuteknologioihin verrattuna ovat hyvät sykli-iat ja raaka-ainei- den halvempi saatavuus. Natriumia saadaan kerättyä huomattavasti helpommin kuin esimerkiksi joissain litiumioniakuissa käytettävän kobolttia. Suurimpana haittana pidetään pienempää energiatiheyttä. Tämä tarkoittaa, että natriumio- niakut ovat painavampia ja usein suurempia kuin vastaavan kokoisissa

litiumioniakuissa. Natriumioniakut voivat tulevaisuudessa olla vaihtoehtoja litiumioniakuille, mutta joidenkin arvioiden perusteella tähän voi kuluja vielä useampi vuosi. Työtä kirjoittaessa kuitenkin jo Kiinassa toimiva akkuvalmistaja CATL on ilmoittanut alkavansa varustamaan sähköautoja suola-akuilla. [22; 23.]

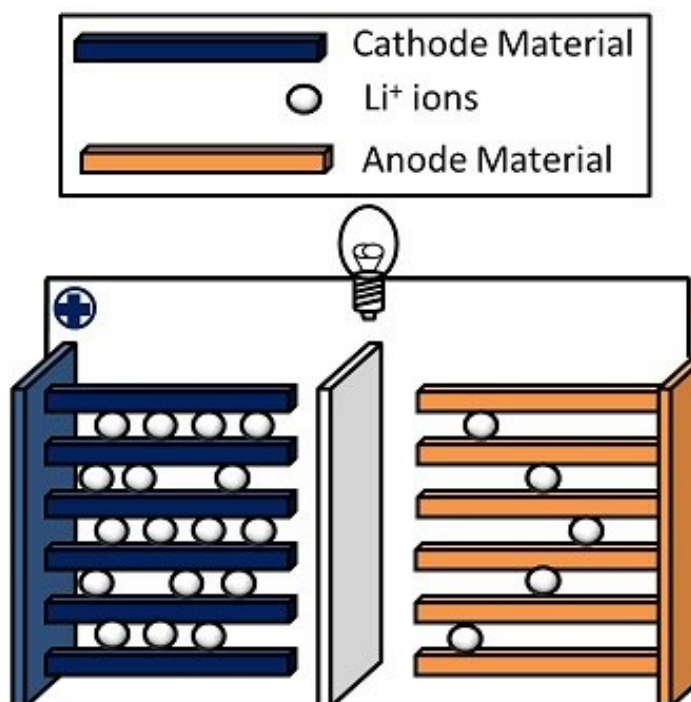
EASE / EERA -tavoite on alle 120 €/kWh hinta natriumioniakustoille vuoteen 2030 mennessä. Sykleihin perustuvaa käyttöikätaavoitetta ei ole asetettu teknologian kohtuullisen uutuuden vuoksi, mutta vuoden 2017 luvut olivat akustojen hinnan osalta noin 240 €/kWh ja käyttöiän osalta yli 5000 sykliä. [14.]

2.3.3 Kiinteäelektrolyyttinen akku

Kiinteäelektrolyyttiset akut (eng. solid-state battery) ovat niin ikään kehitysvaiheessa. Kiinteäelektrolyyttiset akut ovat muihin kemiallisiin akkuteknologioihin, kuten litium- tai natriumakkuihin, perustuvia jatkokehityksiä. Jotkin autovalmistajat uskovat näiden korvaavan tavanomaiset litiumioniakut tulevaisuudessa [24]. Kiinteällä elektrolyytillä tarkoitetaan sitä, että neste- tai geelipohjaisen elektrolyyttiaineen sijasta akun elektrolyyttiaine olisi täysin kiinteä. Näiden akkujen etuina ovat suuremmat energiatiheddet, jolloin litiumioniakkuihin verrattuna saman painoiseen akustoon voidaan varastoida enemmän energiaa. Kiinteäelektrolyyttiset akut voivat olla tavanomaisia akkuja turvallisempia tulipalotilanteissa, sillä akuissa on vähemmän palavaa materiaalia. Akkujen suurimpana haasteena nähdään kuitenkin yhä korkea hinta. [25; 26.]

2.3.4 Litiumioniakku

Litiumioniakku on tällä hetkellä yleisin akkutekniikka sähkön varastointiin. Litiumionitekniikka on käytössä kaikenkokoisissa akuissa, ja on tuttu myös monelle kuluttajalle. "Litiumioni"-termin alle on ryhmitelty monia erilaisia teknologiatyyppejä, mutta näissä kaikissa akuissa litiumionit liikkuvat elektrodien välillä (kuva 7, s. 15). Katodin materiaali ja akun elektrolyyttiaine vaihtelevat suuresti teknologian ja valmistajan mukaan. Litiumioniakkujen etuina on niiden korkea hyötysuhde, jopa yli 90 %, ja hyvät sykli-iat. [1; 14; 18.]



Kuva 7. Litiumioniakun rakenne yksinkertaistettuna. [27]

Litiumioniakkujen hinta on laskenut vuosien saatossa, mutta vuonna 2022 niiden hinta kilowattituntia kohden on noussut ensimmäistä kertaa sitten vuoden 2013. Vuonna 2013 litiumioniakkujen keskihinta on ollut noin 732 Yhdysvaltain dollaria jokaista kilowattituntia kohden. Vuonna 2021 hinta on ollut noin 141 \$/kWh, ja vuonna 2022 noin 151 \$/kWh. Hinnannousu voidaan selittää yleisellä toimitusketjujen hintojen nousulla. Hintojen lasku on kuitenkin yhä odotettavissa, ja ennustettu hinta on vuonna 2026 100 \$/kWh. [15.]

EASE / EERA -tavoitteet litiumioniakuille vuoteen 2030 mennessä ovat 100 €/kWh hinta akustoille ja 10 000 syklin käyttöikä hiilianodisille kennoille. Vuoden 2017 luvut vastaavasti olivat 250 €/kWh ja 5000 sykliä. Lisäksi tavoitteena on parantaa akkujen energiatiheyttä ja turvallisuutta. [14.]

Tällä hetkellä sähköautojen ja -varastojen käyttämissä litiumioniakkujen tekniikoissa on käynnissä pienimuotoinen läpimurto, kun litium-rautafosfaattiakut ovat

yleistymässä ja mahdollisesti korvaamassa tämän hetken johtavaa teknologiaa, joissa käytetään nikkeliä, mangaania ja kobolttia. Koboltin louhintaan on liittynyt monia eettisiä kysymyksiä, ja rautafosfaattiakut ovat myös paloturvallisempia. [28.] Muun muassa sähköautovalmistajat Tesla ja BYD käyttävät rautafosfaattisia litiumioniakkuja ajoneuvoissaan. [29.] Socomecin SUNSYS HES L -sähkövarastojärjestelmä käyttää myös näitä akkuja.

2.4 Ohjausohjelmisto

Sähkövarastoihin oleellisena osana kuuluvat myös ratkaisut, joilla varastoa ohjataan. Jotta sähkövarastosta olisi hyötyä, sen pitää sisältää ohjelmistoa ja elektroniikkaa, jotka määrittävät akkujen latauksen ja purun. Tästä puhutaan joskus akunhallintaohjelmistona tai BMS:nä (*Battery Management System*). BMS-laitteistoja on saatavilla jopa kuluttajakäyttöön, useimmiten aurinkopaneelien yhteyteen liitettävien akkujen kanssa. [30.] Ohjelmiston pitää myös tukea sekä nopeita muutoksia kiinteistön sähkönkulutuksen tukitoimissa että ajastettuja toimintoja markkinatoimia hyödynnettäessä. Akuston latausta ohjaamalla voidaan myös vaikuttaa akkujen käyttöikään. Optimaalinen purku- ja lataussyklien ohjaaminen voi pidentää litiumioniakkujen ikää ja täten vähentää laitteen näennäisiä käyttökustannuksia harventamalla akkujen mahdollista vaihtoväliä.

Hyvä ohjausohjelmisto käyttää montaa eri datan lähdettä tekemään kustannustehokkaita päätöksiä sähkövaraston toiminnan kannalta. Kiinteistön kulutushistorian perusteella älykäs ohjelmisto voi hyödyntää koneoppimista, jolloin laitteisto kehittää toimintaansa jatkuvasti ja osaa varautua tulevaisuudessa samankaltaisiin tehopiikkeihin tai sääolosuhteisiin. Säähän tulee myös varautua ennakkoivasti, sillä aurinkoisella ja tuulisella säällä sähkömarkkinoilla hinnat laskevat. Sääennusteita tuotetaan nykyaikana suurella tarkkuudella, ja ne ovat yhdistettävissä historiatietoihin datan tarkkuuden parantamiseksi. [31.]

Ohjausohjelmiston pitää myös pystyä jakamaan toimintaa sähkövaraston eri ominaisuuksien välillä ja laskemaan optimaalinen tuotto tuntikohtaiseksi. Joinakin käyttöaikoina kuorman siirto voi tuoda parhaan säästön, ja toisinaan taas

reservimarkkinoiden tuomat tuotot ovat taloudellisesti paras valinta. Mikäli sähkövarasto on mitoitettu tarpeeksi suureksi, pystytään monia tehtäviä suorittamaan samanaikaisesti. [31.]

3 Energiavarasto investointina

Jotta sähkövarastot tulisivat yleistymään, tulisi niiden tuottaa jonkinlaista hyödykettä omistajilleen. Varastoa voidaan pitää suurena taloudellisena investointina, ja kohtuullisen tuoreen teknologian käyttökohteita on yllättävän monia. Energiavaraston taloudelliset puolet voitaisiin jakaa säästöihin ja kaupankäyntimahdollisuuksiin. Säästökäytössä sähkövarastolla säästetään rahaa yleensä verkosta ostetun sähkön vähentymisen muodossa. Kaupankäyntimuodossa taas sähkövarastoa voidaan käyttää joko sähkömarkkinoiden suhdanteiden hyödyntämisessä, tai täysin energiavarastoille uniikeilla reservimarkkinoilla. Jotta sähkövarastoa voitaisiin hyödyntää maksimaalisen tehokkaasti, tulee sen yleisen rakenteen ja etenkin säätöohjelmiston olla sopiva toivottuun käyttökohteeseen. Kaupan käyminen sähkövarastolla vaikuttaa ulkoisesti monimutkaisemmalta kuin säästökäyttö.

Sähkövarastoyhtiö Cactos arvioi, että parhaan hyödyn saamiseksi investoinnista tulisi kiinteistön pääsulakkeen olla mitoitettu noin 100 A:n kokoiseksi josta 50 kW / 100 kWh sähkövaraston moduulia kohden. [32.]

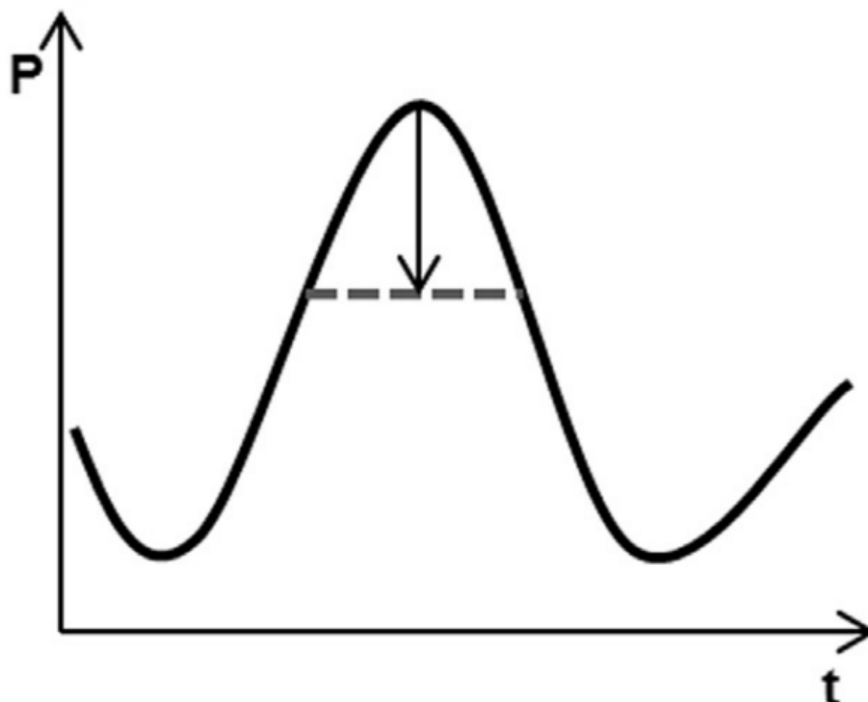
3.1 Säästökohteet

Säästökohteita eli tapoja, joilla sähkövarastolla voidaan vähentää kiinteistön sähkölaskun loppusummaa, on kahdenlaisia, kulutushuippujen leikkaaminen ja kuorman siirto. Käytännön ero säästötoimenpiteillä ei ole suuri, ja näiden tuottama hyöty voi syntyä samanaikaisesti. Säästötoimenpiteiden tehokkuus vaihtelee suuresti kiinteistön sähkösopimuksen hinnoittelusta.

3.1.1 Kulutushuippujen leikkaaminen eli peak shaving

Kun sähköverkkoyhtiöt rakentavat yhteyksiä talouksiin ja kiinteistöihin, niiden tulee kiinnittää huomiota siihen, että kaapelit pystyvät syöttämään verkon vaatiman huipputehon loppukäyttäjille. Tehotarpeiden kasvaessa myös kaapelien koko ja täten kustannukset kasvavat. Sähköverkkoyhtiöt kattavat omia kuluja ja investointejaan asiakkailta perittävillä siirtomaksuilla. [33.] Yhtiöt ovatkin alkaneet asettaa käyttäjilleen tehomaksuja hillitäkseen tehokuormien rajatonta kasvua. Varsinkin teollisuuslaitoksille ja suurille kiinteistöille käytössä oleva tehomaksu voi aiheuttaa korkeitakin kuluja. Esimerkiksi Helenin sähköverkoilla tehomaksu pienjännitekäyttäjille lasketaan kuukausikohtaisesti, mikä perustuu suurimpaan tunnin aikana nousseeseen keskitehoon, joka syntyy arkena kello 7–21. Lahti Energia taas muodostaa tehomaksun vuositasolla, 12 kuukauden aikajaksolla suurimman tunnin aikana kulutetun energiamäärän mukaisesti. Tällaisessa tapauksessa yhden tunnin aikana muodostuva suuri tehopiikki nostaa tehomaksun koko vuoden ajaksi. Sähköverkkoyhtiöt myös veloittavat asiakkailtaan kiinteistön pääsulakkeen mukaista maksua, ja pääsulakkeen koon kasvattaminen voi olla kallis urakka kohteen tehon määrän kasvaessa. [34–36.]

Sähkövarasto voi purkaa akkujaan kiinteistön sisäiseen sähköverkkoon, jolloin kantaverkosta vaadittava teho laskee (kuva 8, s. 19). Tätä kutsutaan *peak shaving*iksi. Tehomaksun pienentäminen voi siis huippuja leikkaamalla olla suora tapa säästää sähköverkon käytöstä johtuvista kuluista. Oleellista huippujen leikkaamisessa on sähkövaraston ohjausjärjestelmän nopea reagoiminen kohoavaan tehontarpeeseen, sekä kyky ennustaa tulevia piikkejä perustuen aiempaan dataan. [37.]



Kuva 8. Esimerkkikuvaaja tehopiikin leikkaamisesta. [38]

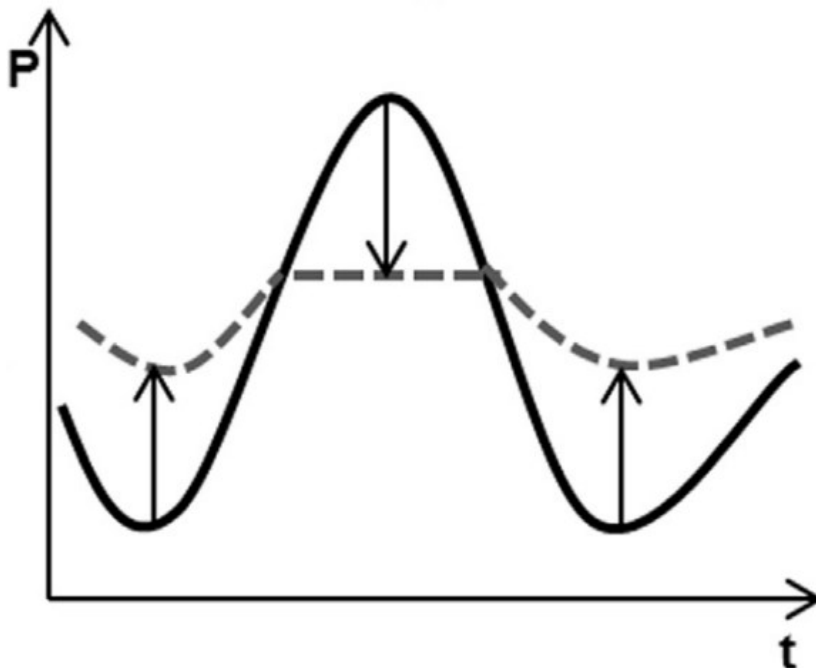
Vihreän siirtymän myötä ladattavien autojen määrä lisääntyy. Kun arki-aamuna isoon kiinteistöön saapuu monta sähköautoa, ja nämä kytketään samanaikaisesti latautumaan, voi syntyvä tehopiikki nostaa kulutusta huomattavasti. Tähän yhdistettynä muut aamuihin liittyvät toimet kuten laitteiden ja valojen käynnistys voivat aiheuttaa kiinteistön sähkökulutukseen suuriakin piikkejä. [37.]

Tehopiikkien leikkaamisesta puhuttaessa oletetaan, että kiinteistön käyttämä teho laskee kokonaisuudessaan. Todellisuudessa tämä ei pelkästään sähkövarastojen osalta ole todenmukainen tilanne, sillä akuista purettu sähkö täytyy myös ladata uudelleen seuraavaa käyttökertaa varten. Ainoat ulkoisesti tarkasteltavat tavat laskea tehopiikkejä ovat kulutuksen vähentäminen tai oman sähkötuotannon lisääminen. Akuista purkautuva tehopiikkejä leikkaava sähkö täytyy myös ladata, ja mikäli tämä tehdään kantaverkkoa hyödyntäen, ei verkosta otettavan lopullisen sähkön määrä muutu, vaan käyttö on todellisuudessa *load shiftingiä* eli kuorman siirtoa. Toisaalta, jos kiinteistön oman tuotannon käyttöasetta parannetaan, on kyse puhtaasta huipputehon vähentämisestä. Tällöin sähkövarastoista puretaan esimerkiksi aurinkopaneelien tuottamaa sähköä. [37.]

3.1.2 Kuorman siirto eli load shifting

Mikäli kohteessa ei ole omaa energiantuotantoa, mutta tehopiikkien tasaamiselle on tarvetta, voidaan hyötyä kuorman siirtämisestä eli *load shifting*istä. Tällöin laajemman tarkastelun aikana kiinteistön kuluttaman sähköenergian määrä ei muutu, mutta tehon käyttöä tasataan pidemmälle aikavälille (kuva 9). Esimerkiksi tehdas- tai toimistokiinteistöissä, joissa käyttöä ei ole iltaisin ja öisin, voidaan sähkövarastoa purkaa päivisin, kun sähkön tarve on suurin, ja ladata taas öisin, kun tarve pienenee. Tällaisessa käytössä voidaan myös hyödyntää sähkön hinnan mahdollisia muutoksia, sillä usein sähkön hinta laskee öisin, jolloin kulutuskin on pienempää. [37.]

Tehopiikkien ja kuormansiirron erot siis eivät ole suuria, ja paras hyöty saata- neen näiden tekniikoiden yhdistämisestä. Tällaisessa tapauksessa myös aurin- kopaneeleihin investoiminen sähkövaraston yhteydessä voi tuottaa nopeampaa säästöä kuin puhtaasti sähkövaraston hyötyihin luottaminen.



Kuva 9. Esimerkkikuvaaja kuorman siirrosta. [38]

3.2 Kaupan käyminen sähkövarastolla

Aiemmin puhuttujen säästökohteiden lisäksi energiavarastot voivat tuottaa taloudellista hyötyä myös suorana rahallisena tuottona. Tällaisia tapauksia ovat sähkön markkinahinnan muutosten hyödyntäminen ja Fingridin reservimarkkinat. Kaupan käyminen sähkövarastolla lienee houkuttelevinta sellaisissa kohteissa, joissa varavoimalle on tarvetta hätätapauksissa ja joissa suurimman osan ajasta varavoimalaitteet ovat käyttämättöminä. Näin ollen tyypillinen varavoimainvestointi, kuten generaattori, saadaan korvattua sähkövarastolla, joka pystyy mahdollisesti paikkaamaan omia hankintakulujaan.

3.2.1 Sähkön osto ja myynti

Mikäli kiinteistön sähkösofimus on pörssisähkömuotoinen, kulutetun sähkön hinta vaihtelee tunneittain. Näin ollen sähkövarastoon voidaan varastoida sähköä, kun tuntihinta on alhainen, ja myydä se takaisin sähköverkkoon hinnan ollessa korkeampi. Tuottoa voidaan myös tehdä ostamalla varastoon sähköä halpaan hintaan, esimerkiksi tuulisina tai aurinkoisina päivinä, jolloin sähkön hinta on uusiutuvien tuotantolaitoksien takia halvempaa. Tätä halvemmalla hinnalla varastoitua sähköä voidaan käyttää hinnan noustessa. Hintaeron tulee olla sellainen, että saadulla tuotolla katetaan sähkön ostohinnan lisäksi siirron tuomat kulut. Mikäli sähkövaraston huipputeho ylittää 100 kilowattia, tulee sen liittäminen sähköverkkoon tehdä aina yhteistyössä verkkoyhtiön kanssa. Tällöin myös sähkön myyminen sähkövarastosta seuraa eri säädöksiä kuin pienemmän teholuokan varaston kanssa toimittaessa. Sähkövaraston ohjausohjelmiston vastuulle jää lopullinen päätöksenteko ostamisen ja myymisen suhteista. Suurimmat mahdolliset tuotot sähkömarkkinoilta voidaan saada, kun sähkön hinnan heittelyt ovat suuria ja nopeita, kuten vuoden 2022 talvella tapahtui.

3.2.2 Reservimarkkinat

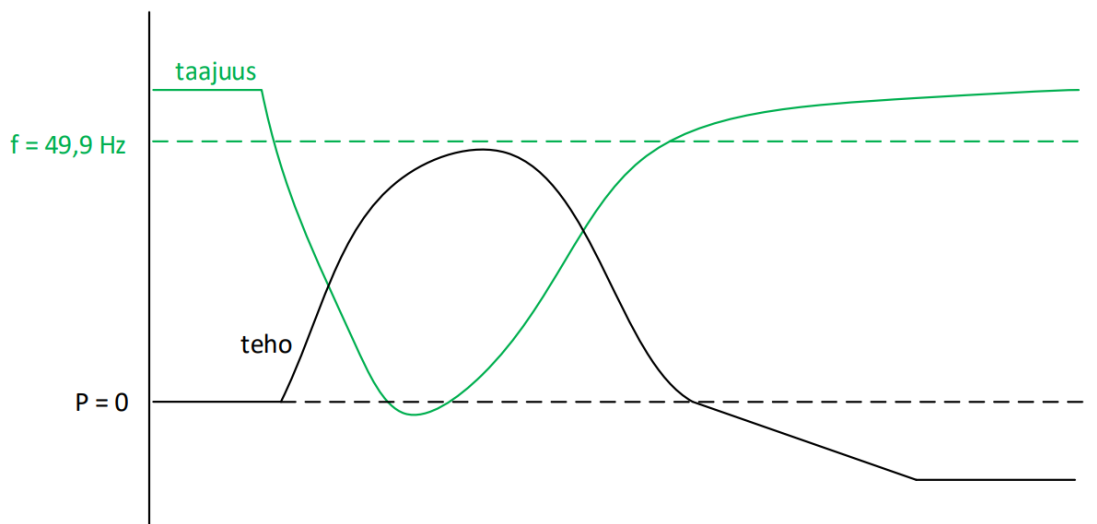
Suomi on osa pohjoismaista kantaverkkoa, johon kuuluvat myös Ruotsi, Norja ja osa Tanskaa. [39.] Tämän käytössä olevan sähköverkon taajuus on

tasapainotilassa 50,0 hertsiä. Tasapainotila saavutetaan vain silloin, kun sähkön kulutus ja tuotanto ovat täsmälleen samat. Suuren kulutuspiikin syntyessä verkkoon taajuus laskee. Mikäli taajuus laskee liian alas, voivat verkkoon liitetyt sähkölaitteet kärsiä, tai pahimmassa tapauksessa syntyä sähkökatkoja verkkoon. [40.]

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingridin tehtävänä on sekä ennustaa tulevaa kuormaa, mutta myös jatkuvilla toimilla tasapainottaa verkon kuormaa sen muuttuessa. Käytön aikana tapahtuvat nopeat tasapainotukset voidaan hoitaa niin kutsutuilla reserveillä, joita voidaan hankkia kaikilta sähkömarkkinoihin osallistuvilta osapuolilta. Reserveillä voidaan tarkoittaa nopeasti aktivoitavia tai säädeltäviä voimalaitoksia, tai tässä tapauksessa sähkövarastoja, jotka voivat tarvittaessa purkaa tai varastoida sähköä. Tällöin sähkövarastot voivat ulkoapäin tarkasteltuna syöttää sähköä verkkoon ja toimia ikään kuin voimalaitoksena, ladata omia akkujaan ja täten toimia suurempana kuormana, tai tyhjentää omia akkujaan kytkettyyn kiinteistöön, jolloin kiinteistön verkosta tarvittava sähkö ja teho vähenvät.

Sähkövarastot soveltuvat kolmeen eri reservimarkkinaan, jotka ovat nopea taajuusreservi FFR (*Fast Frequency Reserve*), taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D (*Frequency Containment Reserve*) ja taajuusohjattu käyttöreservi FCR-N. Näistä kahteen ensimmäiseen osallistumiseen vaaditaan vähintään 1000 kW eli 1 MW:n tehoinen sähkövarasto. Taajuusohjattuun käyttöreserviin osallistumiseen vaaditaan vähintään 100 kW tehoinen sähkövarasto, joka on näin laajemmin saatavilla useammalle kiinteistökohteelle. Taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D voidaan edelleen jakaa ylä- ja alasäätöisiin reserveihin. ”FCR-D alas” tarkoittaa reservimarkkinaa, jossa sähkövarasto tulee kyetä lataamaan itseään sellaisessa tilanteessa, jossa verkossa on ylimääräistä tehoa ja siten verkon jännite nousee yli taajuuden normaalialueen. ”FCR-D ylös” taas vastaavasti tarkoittaa reservimarkkinaa, jossa sähkövaraston tulee tuottaa verkon suuntaan tehoa, kun verkon taajuus laskee yli normialueen (kuva 10, s. 23). Kun verkon taajuus on palautettu, sähkövarasto lataa taas akkunsaa täyteen ja valmistautuu uuteen mahdolliseen aktivointiin. Huomioitavaa on myös, että taajuussäädöt voidaan

toteuttaa myös kulutuksen muutoksella, mutta käytännössä tämän toteuttaminen kuulostaa monimutkaisemmalta. FCR-D-taajuusreserveillä pyritään pitämään verkon taajuus yli 49,5 ja alle 50,5 Hz:ssä. FCR-N:n käytössä olevat reservit pyrkivät pitämään verkon taajuuden jatkuvasti normaalialueella eli 49,9–50,1 Hz. FCR-N-markkinalla toimivan sähkövaraston pitää kyetä joko syöttämään tai vastaanottamaan tehoa jatkuvasti täydellä kapasiteetilla. Tämä tarkoittaa sähkövaraston osalta sitä, että sähkövaraston tulee olla jatkuvasti valmiudessa sekä purkamaan että lataamaan omia akkujaan, eli akut eivät voi olla tyhjiä tai täysiä markkinoille osallistumisen aikana. FCR-D-markkinalla voidaan taas päättää ylös- tai alassäädettävälle markkinalle osallistuminen erikseen, joten sähkövaraston käyttö voi olla vapautettu kohteen muuhun käyttöön vapaammin. [13; 41; 42.]

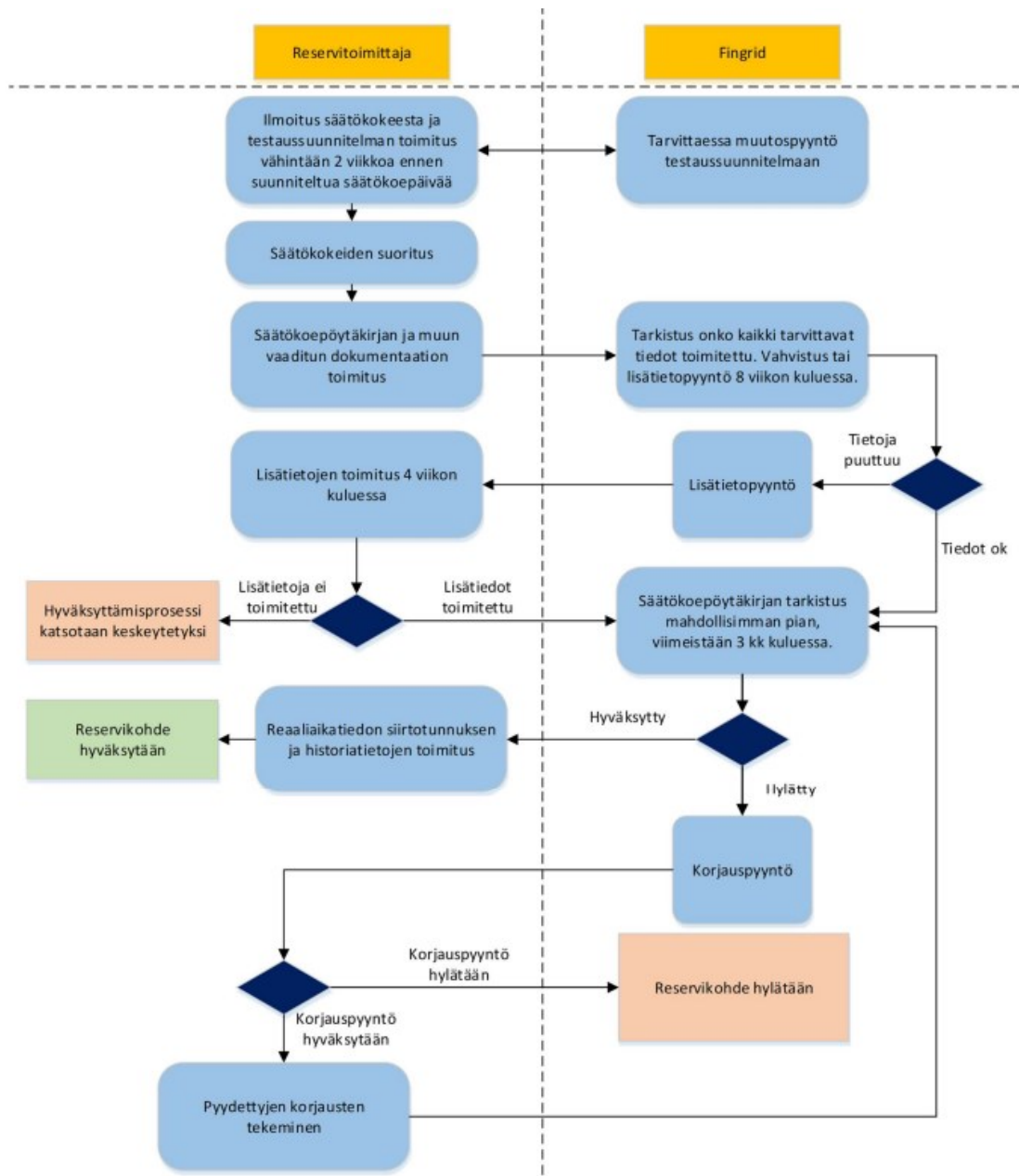


Kuva 10. Sähkövaraston toiminta "FCR-D ylös" -markkinalla. [43]

Reservimarkkinoihin osallistuttaessa on tärkeää huomioida, että Fingrid on asettanut reserviteholle ja sen yhtäjaksoiselle käyntiajalle vähimmäisarvot. Taajuusohjatuissa häiriö- ja käyttöreserveissä FCR-D:n ja FCR-N:n täysi teho on oltava käytettävissä 30 minuutin ajan yhtäjaksoisesti. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi 1 MW sähkövaraston on kyettävä purkamaan tai lataamaan 500 kWh:n verran energiaa, ja energian määrän seurantaan vaaditaan reaaliaikainen tieto. Lisäksi taajuusohjatun häiriöreservin FCR-D markkinoilla käytetyn

sähkövaraston tulee kyetä lataamaan itsensä tähän täyteen aktivointikykyyn vähintään 2 tunnin aikajaksossa. [41; 43.]

Markkinoihin osallistuminen on täysin vapaaehtoista, ja ennen ensimmäistä osallistumista Fingrid käy läpi reservisäädön toimittajan kanssa hyväksyttämisen prosessin ja säätökokeen (kuva 11).



Kuva 11. Fingridin asettama hyväksyttämisen prosessi reservitoimittajille. [43]

Sähkövarastoja voidaan kaupata Fingridille osallistumalla tuntimarkkinoille, jolloin sähkövarastot tarjotaan reserviksi edeltävänä iltana seuraavaksi vuorokaudeksi kerrallaan. Sähkövarastojen hallintaohjelmisto tai manuaalinen käyttäjä itse jättää tuntikohtaukset tarjoukset, ja Fingrid ostaa tarvittun reservin tuntikohtaisesti markkinoille jätettyjen tarjousten mukaisesti. Vaihtoehtoisesti, mikäli sähkövaraston käyttöä voidaan ennustaa pidempiaikaisesti, voidaan osallistua vuosikohtaisille reservimarkkinoille. Tällöin syksyllä järjestetään tarjouskilpailu, jolla päätetään koko seuraavan vuoden vuosimarkkinoiden reservit. Nämä otetaan käyttöön tuntipohjaisesti, ja toimivat ensisijaisina reserveinä. Niiden tarvetta paikataan tuntikohtaisilta markkinoilta ostettavilla reserveillä. [41; 42.]

Vuonna 2022 Fingridin tietojen mukaan nopeaan taajuusreservimarkkinaan FFR osallistui sähkövarastoja yhteensä lähes 30 megawatin edestä. Taajuusohjattuun käyttöreservimarkkinaan FCR-N saatiin vuonna 2021 lokakuussa noin 17500 MWh energiaa sähkövarastoista. Vuoden 2022 tammikuussa toteutuneiden kauppojen mukaan taajuusohjatun häiriöreservin FCR-D-markkinoilta saatiin noin 10000 MWh:n verran energiaa vain sähkövarastojen osalta. [44.]

Reservimarkkinoilla tullaan todennäköisesti kokemaan suuri tarve lisäreserveille tulevaisuudessa, kun tuulivoiman määrä kasvaa. Tavanomaisissa voimaloissa, kuten vesi- ja lämpövoimalaitoksissa, sähköä luodaan pyörittämällä turbiinia, joka taas pyörittää generaattoria. Generaattori on ikään kuin fyysisesti kytkeytyneenä verkkoon, ja pyörii samalla taajuudella kuin verkko, vastustaen samalla verkossa syntyviä taajuuden muutoksia. Tuulivoimalla tuotettu sähkö vastoin kytkeytyy verkkoon taajuusmuuttajien välityksellä, ja nämä tehoelektronikan laitteet eivät muodosta omaa taajuuttaan. Taajuusmuuttajat eli suuntaajat havaitsevat verkon taajuuden, ja seuraavat sitä, syöttäen verkkoon tehoa samalla taajuudella kuin verkko sillä hetkellä on. Tällaisissa tapauksissa suuntaajilla tuotettu sähkö ei siis vastusta verkon muutoksia samoin tavoin kuin tavanomainen, generaattorilla tuotettu sähköverkko. Fingridin mukaan verkon tasaisuus voi siis heiketä, ja reservimarkkinoilta voidaan saada tähän suurempaa tukea tulevaisuudessa. [45.]

Suomen tämän hetken lainsäädäntö ja direktiivit määrittävät, että verkkoyhtiöt eivät voi omistaa sähkövarastoja. Täten sähkövarastoihin perustuvat kaupan käynnit ovat puhtaasti markkinoiden ohjaamia. Reservimarkkinoiden rahallinen korvaus määräytyy osallistutun markkinan perusteella. Vuosimarkkinalle osallistuvan reservin hinta lukittautuu syksyn tarjouskilpailuiden perusteella koko seuraavaksi vuodeksi, ja määräytyy kalleimman hyväksytyyn tarjouksen mukaisesti. Vaihtoehtoisesti vapaammille, mutta heikommin ennustettaville tuntikohtaisille markkinoille hinta perustuu jokaisen vuorokauden edeltävänä iltana käytyihin ostoihin. Jokaiselle tunnille Fingrid ostaa erikseen käytettävää reservikapasiteettia, ja tunnin kauppahinta perustuu kalleimman käytetyn tarjouksen mukaisesti. Tällaisessa tapauksessa markkina on siis todella volatiili, ja perustuu puhtaasti kysynnän ja tarjonnan lakiin. [13.] Vuodelle 2023 vuosimarkkinoiden hinta (taulukko 1) on lukittu vuoden 2022 syksyllä, ja eri säätötoimille on omat hintansa. FCR-N-markkinoilla olevan reservin käyttökorvaus on suurin ja määrä pienin oletettavasti siihen osallistuvien laitteiden vaatimusten ja jatkuvan säädön tarpeen vuoksi. Taulukossa 1 kuvattu vuosimarkkinamäärä tarkoittaa maksimikapasiteettia, jota vuosimarkkinoilla on, mutta todellinen kapasiteetti vaihtelee tunneittain. [46.]

Taulukko 1. Taajuusohjattujen reservien vuosimarkkinahinnat. [46]

Vuosi	FCR-N hinta (€/MW,h)	FCR-N määrä (MW)	FCR-D ylös hinta (€/MWh,h)	FCR-D ylös määrä (MW)	FCR-D alas hinta (€/MW,h)	FCR-D alas määrä (MW)
2022	12,24	102,8	1,9	430,6	10,00	114,4
2023	19,10	67,7	2,81	345,1	9,99	186,4

Fingridin sivuilta saadaan myös toteutuneiden kauppojen tuntimarkkinahinnat. Vuoden 2022 keskiarvohinta taajuusohjatulle käyttöreserville FCR-N oli 37,56 €/MW tuntia kohden. Kauppahintoja tarkastellessa voidaan myös huomata, että toisinaan reservejä on ostettu jopa 200 €/MW hintaan, ja 26.5.2022 jopa 300 €/MW hintaan. Tosin markkinoiden sanelemana korvausmaksu laskee useasti myös vuosimarkkinakorvauksen tason alle. Sähkövarastosta voi siis tarkkaa

hintakilpailua käymällä saada massiivisia tuntikohtaisia tuottoja. Vuoden 2023 ensimmäisen kvartaalin toteutuneet tuntimarkkinakorvaukset FCR-N-markkinnalla ovat olleet 25,46 €/MW. Keskiarvallisesti tutkittuna siis FCR-N-tuntimarkkinnalle osallistuminen antaa suuremmat korvaukset kuin vuosimarkkinat. [46.]

Kuten aiemmin mainittiin, FFR- ja FCR-D-markkinoille osallistuminen vaatii sähkövarastolta vähintään 1 megawatin kapasiteetin. Tämän kokoluokan investointi on jo todella suuri ja sulkee suuren osan sähkövarastojen loppukäyttäjistä ulos reservimarkkinoilta. Niin ikään FCR-N-markkinoille asetetun 100 kW kapasiteetin minimi rajoittaa myös monia saatavilla olevia sähkövarastoja ulos markkinoilta. Ratkaisuna voi kuitenkin olla sähkövarastojen virtuaalinen yhdistäminen. Näin tekee esimerkiksi Cactos-sähkövarastoyhtiö. Yhtiön 50 kilowatin kapasiteetin järjestelmät eivät yksittäisinä laitteina pysty osallistumaan reservimarkkinoille. Täten ne kasautuvat yhdeksi voimalaitokseksi, jota kaupataan Fingridin reservimarkkinoissa yhtenä yksikkönä. Mikäli sähkövarastoja hankitaan samalla kokoonpanolla moneen eri kohteeseen, voidaan mahdollisesti pienistäkin järjestelmistä kootulla virtuaalireservillä osallistua markkinoille. Tämä mahdollistaa myös fyysisen hajauttamisen, jolloin sähköverkon muutoksia voidaan tukea tasaisemmin koko maan laajuisesti.

3.3 Takaisinmaksuaika

Takaisinmaksuajan arvioiminen sähkövarastojärjestelmälle on hankalaa, sillä muuttujia hankinnan osalta on todella monia. Laitteen hankintahinta muodostuu järjestelmän kapasiteetin ja energian varastointimahdollisuuden mukaisesti. Lisäksi hankintakuluihin täytyy huomioida laitteen asennuskulut ja mahdolliset erot valmistajien välillä. Laitteen käyttöaikaiset kustannukset koostuvat pääasiassa sähkön kulutuksesta laitteiston elektroniikan ylläpidon osalta. Hyötysuhteen takia hukattu lämmöksi muuttuva sähkö tulisi myös arvioida käyttökustannuksissa. Myös akkujen kulumisen ja laitteiston huoltokustannukset aiheuttavat kuluja vuosittain. Akkujen käyttöiästä saadaan arvio valmistajan luvattujen sykli-määrien perusteella, mutta niiden uusintahintaa tulevaisuudessa voi olla vaikeaa arvioida alati liikkuvan markkinan takia.

Laitteen tuomat säästöt vaihtelevat pitkälti sähkön hinnan ja kiinteistön oman tuotannon vaihteluiden mukaisesti. Mikäli energian hinta on alhaista, eikä vaihtelee suuresti, sähkömarkkinoiden suhdanteiden hyödyntäminen ei ole yhtä tehokasta. Toisaalta suuret heittelyt markkinahinnassa voivat mahdollistaa suuremmat säästöt kuormansiirtoa hyödyntämällä. Tehopiikkien leikkaaminen on aina tapa säästää, mutta sen tuomaa hyötyä arvioidessa täytyy laskea siihen tarvittavan sähkövaraston kapasiteetti ja varastoitavan energian määrä. Jos leikattavat tehopiikit ovat suuria, vaaditaan myös varastointijärjestelmältä suurta huipputehoa. Varastoitu energia pitää myös riittää koko tehopiikin ajankohdan yli. Oman tuotannon lisääminen esimerkiksi aurinkopaneelien muodossa voi lisätä sähkövaraston tuomia säästöjä, kun itse tuotetulla energialla voidaan paikata kuormansiirron tarvitsemaa akkujen latausta.

Erään suomalaisen tutkimuksen mukaan pienen kokoluokan sähkövarasto puhtaasti oman tuotannon ja kulutuksen käyttöasteen parantamiseen ei ole vielä vuoden 2018 hintalukujen mukaan kannattava investointi. Tutkimuksen hintatasona toimivat sähkövarastolle 429,1 €/kWh ja sähkön hintana 18,3 senttiä/kWh. Tutkimus myös lisää, että mikäli akustojen hinta laskee ja sähkön hinta nousee samankaltaisilla tavoilla, voisi pienen kokoluokan sähkövarasto olla kannattava investointi arviolta vuonna 2033–2035, kun hinnat olisivat alle 407,3 €/kWh ja 20 senttiä/kWh vastaavasti. [47.] Tutkimuksessa käytetään laskujen pohjana 5,3 ja 10,6 kWh:n kokoisia sähkövarastoja. Nämä riittäisivät omakotitalojen käyttöön, mutta kiinteistökoossa sähköntarve on moninkertainen. Yleisesti ottaen suurempien hankintojen osalta laitteiden yksikköhinnat ovat paljon pienempiä, ja tätä voidaan soveltaa myös sähkövarastoihin. Suurten kiinteistöjen käyttöön tulevilla sähkövarastoilla hinta kilowattituntia kohden voidaan siis olettaa pienemmäksi kuin kuluttajakäytössä. Toisen suomalaisen tutkimuksen laskuilla saadaan kuitenkin jo nykytilanteessa vuosittaista säästöä asentamalla aurinkopaneelien yhteyteen sähkövarasto. Tutkimuksen laskutoimitus olettaa sähkövaraston hinnaksi 300 €/kWh, eli huomattavasti alemman kuin aiemmassa tutkimuksessa. [48.]

Benjam Seppäsen vuonna 2022 julkaisema opinnäytetyö käsitteli tuotantolaitoksen tehopiikkien leikkaamista 225 kW kapasiteetin omaavalla sähkövarastolla. Järjestelmän hankintahinta oli arvioitu noin 220 000 € suuruiseksi ilman asennuksia, ja arvioiden mukaan pelkkiä tehomaksuja alentamalla järjestelmän takaisinmaksuaika olisi 34 vuotta. Tällaiseen ajankohtaan tulisi sisällyttää useat akkujen vaihdot ja asennuskustannukset, joten vain tehopiikkejä alentamalla kyseinen järjestelmä tuskin koskaan maksaisi itseään takaisin. [49.]

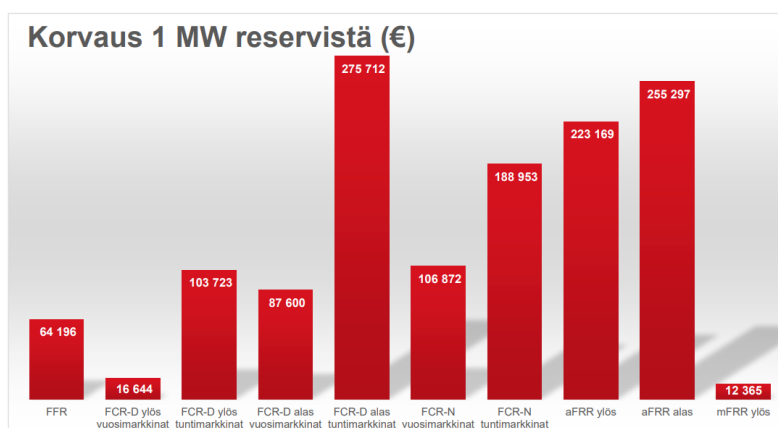
Monet laskelmat sähkövaraston kannattavuudesta ovat joko vanhentuneita nopeasti liikkuvan markkinan takia tai tarkastelevat vain yhtä käyttökohdetta. Jotta jotain lukuja saadaan tukemaan tutkimusta, on helpointa tutkia suoraan verkosta saatavaa dataa. Tätä vain arvioihin perustuvaa lukujen pyörittelyä ei voida kuitenkaan pitää täysin luotettavana, mutta toimii tämänhetkisen markkinan suuntaa antavana tietona. Nopeaa tarkastelua varten sähkövaraston hinta saadaan Teslan Megapack-sähkövaraston hankintahinnasta, joka saadaan suoraan Teslan verkkosivuilta. 9,6 megawatin kapasiteetilla ja 19,3 megawattitunnin varastoitavan energian määrällä varustettu sähkövarasto maksaisi Kalifornian osavaltiossa asennuksineen noin 12,62 miljoonaa dollaria, verottomana. Tämän lisäksi vuosittaiset huoltokustannukset olisivat noin 28 tuhatta dollaria. Tämänhetkisen kurssin mukaan (0,91) muunnettuna hankintahinta olisi noin 11,47 miljoonaa euroa ja jokavuotiset huoltokustannukset noin 26 tuhatta euroa. Tesla Megapack -sähkövarastolle saataisiin siis sähkövaraston hankintahinnaksi noin 650 euroa kilowattitunnin varastointikykyä kohden, asennukset mukaanluettuina. Tässä luvussa ei kuitenkaan saada tietoon erilaisia hintatasoja Kalifornian ja Suomen välillä. [50.]

Fingridin vuoden 2021 toteutuneiden markkinahintojen (kuva 12, s. 30) mukaan FCR-N:n tuntimarkkinoilla olisi voinut saada 9,6 megawatin sähkövarastolla noin 1,8 miljoonan euron korvaukset. Tällaisessa optimitilanteessa suuren skaalan sähkövarasto maksaisi itsensä jo 8 vuoden kuluessa takaisin, pelkästään reservimarkkinoilta maksetuilla tuotoilla. Tässä karkeassa tarkastelussa ei kuitenkaan oteta huomioon sähkön energiamaksuja tai akun kulumisesta syntyviä kuluja. Tuotoista ei oteta huomioon tehopiikkien leikkaamisesta tai

kuormansiirrosta syntyneitä tuloja. Tämän kokoinen sähkövarasto on todella suuri hankinta, ja tämän laajuuden investoinnit Suomessa tapahtuvat harvoin. Pienemmän mittakaavan sähkövarastoissa hinta kilowattitunnin varastointimahdollisuutta kohden on myös todennäköisesti suurempi. Ydinsanoma kuitenkin on se, että sähkövarastot tuottokohteina voivat olla jo mahdollisia ilman, että niiden muita mukana tuomia hyötyjä otetaan huomioon.

Esimerkkejä vuositason korvauksista

Markkina	Hinta (€/MW.h)	Tunteja per vuosi (2021)
FFR	45,4**	1414
FCR-D ylös vm	1,9*	8760
FCR-D ylös tm	12,6**	8232
FCR-D alas vm	10,0*	8760
FCR-D alas tm	32,0***	8616****
FCR-N vm	12,2*	8760
FCR-N tm	21,9**	8628
aFRR ylös	38,9	5737
aFRR alas	44,5	5737
mFRR ylös	2,3	5376



Kuva 12. Fingridin antamia esimerkkikorvauksia vuoden 2021 eri reservimarkkinoilta 1 MW:n reservillä. [41]

3.3.1 Käyttöikä

Sähkövarastojen käyttöikä pohjautuu kahteen eri tekijään. Laitteen elektroniikkaosat voidaan rinnastaa UPS-laitteiden elinkaareen, jolloin muutamien varaosien vaihdolla ja ennakoivalla huoltotoimella elektroniikkapuoli voi hyvinkin pysyä käyttökelpoisena kaksi vuosikymmentä. Säännöllisillä huoltotoimilla varmistetaan laitteen ja sitä mahdollisesti ympäröivän laittilan siisteydestä, laitteen yleisestä toiminnallisuudesta, liitosten kireydestä ja kuluvien käyttöosien ajankohtaisesta vaihdosta. Älykäs ohjausohjelmisto antaa myös paljon dataa käyttäjälleen energiavaraston tilanteesta, jolloin esimerkiksi muuttuneet laitteen arvot voidaan huomioida nopeasti. Isot UPS-laitteet, joiden kanssa tämän opinnäytetyön kirjoittaja työskentelee, yleensä vaihdetaan noin 20 vuoden iässä, sillä varaosien saatavuus alkaa heiketä ja kehittyvä teknologia tuo tässä ajassa

markkinoille parempia ja energiatehokkaampia laitteita. Toisaalta laiminlyödyt huollot voivat nopeuttaa laitteen kulumista ja pahimmassa tapauksessa aiheuttaa yllättävän laiterikon. Suurien järjestelmien huollot voidaan rinnastaa auton huoltotoimiin, jolloin jatkuvalla ennakoidulla huollolla vältytään suurilta remonteilta.

Sähkövaraston akkujen käyttöikä tulee todennäköisesti umpeen huomattavasti nopeammin muihin laitteen osiin verrattuna. Opinnäytetyössä puhuttiin aiemmin erilaisten akkuteknologioiden arvioiduista sykli-i'istä. Näihin pohjautumalla voidaan arvioida sähkövarastojen käyttöikää, mutta tämäkään numero ei anna täyttä kuvaa. Akkujen tasainen ja tehokas käyttö voi pidentää niiden käyttöikää jatkuviin syviin purkauksiin verrattuna. UPS-laitteissa on pitkään käytetty lyijyakuja, jotka on suunniteltu vaihdettavaksi 3–5 vuoden välein. Teknologian kehityksessä on yhä useampi akkuvalmistaja tuonut markkinoille pitkäikäisiä akkuja, jotka ovat UPS-käytössä voineet kestää 7–10 vuoden verran. Litiumioniakuista, joita sähkövarastoissa useimmiten käytetään, ei ole vielä saatavilla vastaavaa dataa. Eräs vuoden 2017 tutkimus, joka pohjautuu matemaattisiin malleihin, kertoo sähkövarastojen akkujen kestoiksi 6–8 vuotta. [51.] Tässä tutkimuksessa ongelmallista on, että akkuteknologian nopean kehityksen takia tutkimus ja sen lähdemateriaali on voinut jo vanheta. Kuulostaa epätodennäköiseltä, että nykyiset litiumioniakut kestävät käyttöä huomattavasti vähemmän, kuin lyijyakut. Täten ainoa varteenotettava numero on tällä hetkellä akkuvalmistajien antamat takuut akuille. Tämän takuun yli akkujen tilannetta voidaan seurata huoltojen yhteydessä. Kun akkujen toimintaikä tulee tiensä päähän, on niiden vaihtaminen todennäköisesti suuri ja kallis toimenpide.

4 Järjestelmä myynnillisesti

4.1 Nykyinen markkinatilanne ja toimijat

Suomessa yritystason sähkövarastojen toimittajina esiin nousevat mm. Merus Power, Cactos, Celltech, Enico, Siemens, ABB ja Eaton. Toimitetuista laitteista ei kuitenkaan tämän opinnäytetyön skaalalla suuresti löydy uutisia, sillä

mielenkiintoa herättävimmät toimitukset tuntuvat olevan suuremman kokoluokan, voimaloiden yhteyteen toimitettavat sähkövarastot. Olen itse keskustellut muutamien näiden yhtiöiden toimihenkilöiden kanssa, ja Merus, Celltech, Siemens sekä ABB ovat omien sanojensa mukaan toimittaneet vain ”muutamia” sähkövarastoja. Cactos toimii aivan toisenlaisella lähestymistavalla, ja toimittaa sähkövarastojana palveluna. Tällöin asiakas sitoutuu vain leasing-sopimukseen, sen sijaan, että hankinta tehtäisiin suurena kertaostona. Kuukausimaksu perustuu laitteiden tuottoihin, jotka voidaan joko pitää asiakkaalla täytenä summana, jolloin sopimuksen kuukausihinta on korkeampi. Vaihtoehtoisesti Cactos voi pitää laitteen tuotot itsellään, jolloin sopimushinta on pienempi. Myös näiden välinen tuottojen jako on mahdollista.

4.2 Yhdistäminen UTU Oy:n muiden tuotteiden kanssa

VTT on ennustanut, että täyssähköautojen lukumäärä ylittää vuoteen 2030 mennessä 120 000 kappaleen rajan ja että lukumäärä olisi vuonna 2050 jo lähes 600 000. [2.] Tämän liikenteen kehityssuunnan takia UTU Oy on viime aikoina keskittynyt kehittämään ja myymään sähköautojen latauslaitteita ja asiaan liittyviä keskuksia. Energiavarastoja voitaisiin suunnitella kiinteistöihin tai itse näisiin latauspisteisiin, joihin autojen latauspisteitä tulee suuria määriä, ja tällöin voidaan sähköautojen latauksista syntyviä suuria tehopiikkejä tasata energiavaraston avulla. Esimerkkinä tällaisesta toiminnasta on Norjassa ja Tanskassa toimivan sähköautojen infraa ylläpitävän Nuvve-nimisen yhtiön julkaisema tiedote, jonka mukaan se yhdistää toimitettuja sähköautojen latauspisteitä hajautettuun energiavarastojärjestelmään. Tätä yhdistettyä järjestelmää käytetään odotustilassa reservimarkkinoilla, jolloin laitteet eivät jää pitkäksi aikaa ilman käyttöä. [52.] Maailman suurin sähköautojen akkuvalmistaja CATL on niin ikään toimittanut sähkövarastojärjestelmiä suurien latausasemien yhteyteen (Kuva 13, s. 33). [53.]



Kuva 13. Sähköautojen latauspiste, jossa etualalla suuri määrä latauslaitteita, ja taka-alalla konttiin rakennettu sähkövarasto. [53]

UTU Oy tutkii myös aktiivisesti aurinkopaneeliratkaisujen toimitusta, ja näiden yhdistäminen energiavarastoprojekteihin kuulostaa todella houkuttelevalta. Tällä hetkellä aurinkopaneeli-investoinnit ovat nousussa, ja varsinkin isot tehdas- ja liiketilarakennukset, joilla on suuria käyttämättömiä pinta-aloja kattojen muodossa, ovat kiinnostuneita valjastamaan tätä tilaa sähkön vihreään tuotantoon.

UTU Oy valmistaa ja toimittaa myös puistomuuntamoita ja on täten mukana sähkönjakelun toimialan markkinoilla. Puistomuuntamoiden kaltaiset hajautetut, mutta verkon kautta langattomasti yhdistetyt sähkövarastot voivat olla uusi kehityssuunta sähkönlaadun parantamisen saralla.

Keskeytyksettömän virransyötön ratkaisut ovat UTU Oy:lla yksi suuri kiinnostuksen ja kehityksen kohde. Yhtiöllä on aiemmin ollut pilottina generaattorijärjestelmän toimitus, ja tällaiset hankkeet voitaisiin tulevaisuudessa korvata sähkövarastolla. Myydyillä UPS-laitteilla voidaan suojata kriittiset, herkäät elektroniikkalaitteet, mutta tällä hetkellä sähkövarastot eivät pysty samankaltaiseen

keskeytyksettömään toimintaan, sillä sähkökatkon sattuessa oman verkon luominen voi kestää sähkövarastolta jopa 100 millisekunnin ajan. Tämä aika saattaa kuulostaa pieneltä, mutta herkät elektroniikkalaitteet voivat vaurioitua näinkin lyhyestä sähkökatkosta. UPS-laitteista tällaista aikaa ei käytännössä ole. Isompia projekteja voitaisiin lähestyä uudelta kannalta, jossa iso UPS-järjestelmä, joka suojaa monia laitteita pitkällä varakäyntiajalla, korvataan sähkövarastolla ja useammalla pienemmällä UPS-laitteella. Näin kriittiset käyttökohteet, joissa sähkö ei saa katketa ollenkaan, saadaan suojattua UPS-laitteilla lyhyen aikavälin ajan, ja vähemmän kriittiset kohteet kestävät verkon luomisen aikana syntyvän katkon. Näin tapahtuessa myös sähkövaraston suurempi varastoitu energia voidaan keskittää koko kiinteistölle. Kiinteistön ollessa vikaantumaton, voidaan sähkövarastoa hyödyntää muuhunkin käyttöön, UPS-laitteiden ollessa valmiudessa vain hätätilanteita varten.

5 Tulevaisuuden näkymät Suomessa

Sähkömarkkinoiden tulevaisuutta voidaan arvioida tutkimalla sähköfutuuriin hintaa, joilla sähkön myyntiyhtiöt käyvät kauppaa. Nykyhetkellä futuurit näyttävät laskevan kesää 2023 kohti, ja nousevan taas talveksi. Vuoden 2024 ja alkuvuoden 2025 futuurien tilanne on hyvin pitkälti samankaltainen. Futuurimarkkinoiden pohjalta tehtyjen päättelyiden perusteella sähkömarkkinoiden heittely siis jatkuu tulevaisuudessa, ja sähkövarastolla voidaan saavuttaa taloudellista hyötyä. [54.]

Sähkömarkkinoita on kuitenkin mahdotonta ennustaa täydellä varmuudella. Tätä opinnäytetyötä kirjoitettaessa keväällä 2023 monet eri tekijät vaikuttavat jo nyt tulevaisuuden sähkömarkkinoihin. Hintoja laskevinä tekijöinä ydinvoimalla Olkiluoto 3 on vihdoinkin aloittanut toimintansa täydellä kapasiteetilla ja kykenee tuottamaan noin 1600 megawatin kapasiteetillaan noin 30 prosenttia Suomen tarvitsemasta sähköstä. [55.] Fingridin mukaan tuulivoiman kapasiteetti kasvaa tällä hetkellä noin 1000 megawatin verran joka vuosi. [56.] Toisaalta nopeasti kasvava vaihtelevan energian tuotanto kuormittaa sähköverkkoa aivan uudella tavalla.

Monissa kriittisissä kohteissa sähkön saaminen on turvattu katkojen ja onnettomuuksien varalta omilla dieselgeneraattoreilla. Switch (suuri yhdysvaltalainen datakeskusyhtiö) ja Google (hakukone- ja pilvipalvelujätti) ovat molemmat pilotoineet datakeskusten dieselgeneraattorien korvaamista sähkövarastolla. [57.] Tavanomaisessa toiminnassa dieselgeneraattorit seisoisivat pitkiä jaksoja käyttämättöminä, kun taas sähkövarastoja voidaan hyödyntää sähköverkon reservinä jatkuvasti. Suomessa tällaisia generaattoreilla varmistettuja kohteita löytyy mm. datakeskuksista, sairaaloista, pelastuslaitoksista ja suurista teollisuuslaitoksista. Kohteet ovat usein suuria sähkön kuluttajia, jolloin sähkövarastolla voidaan tuoda säästöä ja ylläpitää yhteiskunnallisen verkon sähkönlaatua.

Akkuteknologia kehittyy valtavalla vauhdilla, ja uusia materiaalien kehittäminen ja tutkiminen on jatkuvaa. Rautafosfaatti- ja suola-akut ovat pian siirtymässä valtavirtaan, ja yhä vaativampi autokannan sähköistysprojekti kehittää akkuja nopeasti. Sähköautojen akut voidaan myös tulevaisuudessa valjastaa omiksi pieniksi sähkövarastoiksi, kunhan sähköautojen latausteknologia mahdollistaa sekä auton akkujen lataamisen että purkamisen.

Tällä hetkellä akkuihin sähkön varastointi on yhä huomattavan lyhytaikaisena pidettävää varastointia, mikä johtuu akkujen itsepurkautumisesta. Tällöin pitkäaikainen varastointi alkaa kuormittaa akkuja, ja niihin varastoitu energia purkautuu hitaasti, jopa ilman käyttöä. Vetykaasun tuottaminen sähkövoimalla pieniä generaattoreita hyödyntäen voisi tuoda uusia mahdollisuuksia saman skaalan pitkäaikaiseen energian varastointiin, ja vetygeneraattorit voidaan mahdollisesti rinnastaa samaan kokoluokkaan kuin tässä työssä tutkitut sähkövarastot. Vetykaasutuotannon kehitys myös liittyy vahvasti raskaan liikenteen sähköistymiseen.

Pienemmän kokoluokan sähkövarastot alkavat myös todennäköisesti lisääntymään, kun aurinkopaneeleihin investointien jatkuu kotitalouksissa. Jo nyt omakotitalojen katoilla näkee pitkiä rivejä paneeleita lähes jokaisessa lähiössä. On vain ajan kysymys, kunnes jokin yhtiö saa luotua todella houkuttelevan ja

kuluttajille suunnatun sähkövarastotuotteen, samalla tavalla kuin Tesla sai lyötyä sähköautotuotteensa markkinoille kaikkien tietoisuuteen.

Suuren skaalan sähkövarastojen osalta kilpailu tulee todennäköisesti lisääntymään, kun pilottikohteet alkavat toimimaan osana päivittäistä markkinaa ja kun yleinen kiinnostus laitteistojä kohtaan nousee. Monet osapuolet, jonka kanssa olen asiasta keskustellut, kaipaavat kuitenkin markkinoille valmiita mitoitusohjelmia. Aurinkopaneelien mitoitus ja erilaiset laskelmat ovat loppukäyttäjille helppoja, sillä internetissä on tällaisia laskentaohjelmia ilmaisjakelussa jo monia. Konkreettisen laskentadatan esittäminen helpottaisi hankintapäätöstä suuresti. Saksassa ja Isossa-Britanniassa sähkövarastojen asennus on huomattavasti yleisempää kuin Suomessa, joten kenties näistä maista voitaisiin hakea oppia.

6 Yhteenveto

Sähkövarastojen määrä Suomessa ei ole vielä suuri, mutta teknologia on murrospisteessä. Vuoden 2022 energian hintojen heittely on vauhdittanut keskustelua omavaraisuudesta, ja uusiutuvan sähköntuotannon investoinnit jatkuvat nousujohteisesti. Erilaiset muutokset sähkön kulutuksen rakenteessa ja verkon tasapainottamisessa puoltavat niin ikään sähkövarastojen investointeja jokaisessa skaalassa. Sähkövarastojen yleistymisessä voidaan nähdä samankaltaisia piirteitä kuin sähköautojen ensimmäisissä markkinoille tuloissa. Ensimmäiset pilotit maassa on perustettu tutkimustulosten hakemiseksi, pääasiallisesti energiatehokkuuden tai verkon tasapainotuksen tarpeisiin. Tällä hetkellä sähkövarastoista haetaan dataa, joiden pohjalta yrityksille voidaan perustella hankinnat puhtaasti taloudelliselta kannalta. Kuluneina vuosina akkuteknologian kehitys on ollut niin nopeaa, että monet entiset tutkimustulokset eivät enää ole ajan tasalla. Maailmalla, kuten Kiinassa, Yhdysvalloissa ja Saksassa sähkön varastointi on jo saavuttanut voimalatasolla tuulta siipiensä alle. On vain ajan kysymys, että samankaltaisia laitoksia tasaamaan uusiutuvan energian tuottoa rakennetaan Suomessa laajemmin. Tästä seurannee sähkövarastojen osalta organinen kehitys yritysten tuotannon tasaamiseen, teollisuuden tarpeisiin ja lopuksi kuluttajien omiin käyttökohteisiin.

Opinnäytetyön tavoitteina oli kerätä itselleni ja UTU Oy:n henkilöstölle tietoa sähkövarastojen nykyisistä suurimmista puheenaiheista ja tulevaisuuden kehityssuunnasta. Aihe on todella mielenkiintoinen itselleni, ja olen tyytyväinen työhöni koottuun tietoon ja yhtiön sisällä syntyneisiin pohdintoihin. Alkuperäisenä tavoitteena oli myös konkreettisten takaisinmaksulaskelmien tuottaminen, mutta tämä aihealue kuitenkin karsittiin opinnäytetyöstä pois jo alkuvaiheessa. Näin jälkeempäin ajateltuna laskelmien tuottaminen olisi ollut mielenkiintoista ja palkitsevaa, mutta työn paisumista pyrittiin välttämään. Takaisinmaksujen laskemisen osalta muuttujien määrä on suuri, ja koen, että tämän kaltaiseen projektiin kaivattaisiin oikean elämän dataa suuresta kohteesta, jossa kulutus on suurta, ja jolla olisi myös omaa sähkön tuotantoa. Laskelmiin kiinni pääseminen olisi voinut olla aihe opinnäytetyölle jo yksinään. Tämä opinnäytetyö jäi siis lopullisesti vain teorian ja pohdiskelun tasolle, mutta oppimisen halu aiheesta kasvoi entisestään. Yritysohjaajalla oli työstä samanlaiset mielipiteet, ja keskustelimmekin ajatuksesta työstää takaisinmaksujen laskelmasta taulukoita palkkatyössä. Yritys pyrkii sisälle sähkövarastojen markkinoille, ja kenties pääsen itse olemaan tämän kehityssuunnan aallonharjalla.

Lähteet

- 1 Korpela A. Suuren kokoluokan energiavarastointitekniologioiden teknis-taloudelliset näkymät. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu; 2018. 77 s.
- 2 Energia-+ja+ilmastostrategian+TAUSTARAPORTTI_1.2.+2017.pdf. Verkkoinfo. Saatavissa: https://tem.fi/documents/1410877/3570111/Energia-+ja+ilmastostrategian+TAUSTARAPORTTI_1.2.+2017.pdf#page=18&zoom=100,72,505. Luettu 22.2.2023.
- 3 Frequently Asked Questions (FAQs) - U.S. Energy Information Administration (EIA). Verkkoinfo. Saatavissa: <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php>. Luettu 8.2.2023.
- 4 What is Generation Capacity? Verkkoinfo. Energy.gov. Saatavissa: <https://www.energy.gov/ne/articles/what-generation-capacity>. Luettu 16.4.2023.
- 5 Grid-Scale Storage – Analysis. Verkkoinfo. IEA. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage>. Luettu 7.2.2023.
- 6 Net Zero by 2050 – Analysis. Verkkoinfo. IEA. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. Luettu 7.2.2023.
- 7 Sähkön tuotanto ja kulutus. Verkkoinfo. Fingrid. 2017. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>. Luettu 14.2.2023.
- 8 Akker JM, Blok H, Budd C, Eggermont R, Guterman A, Lahaye D, ym. A Case Study in the Future Challenges in Electricity Grid Infrastructure. 2012.
- 9 Faranda R, Leva S. A comparative study of MPPT techniques for PV systems. 2008.
- 10 SUNSYS HES L - Energy storage modular systems | Socomec.com. Verkkoinfo. Saatavissa: https://www.socomec.com/range-energy-storage-modular-systems_en.html?product=/sunsys-hes-l_en.html. Luettu 9.3.2023.
- 11 Battery Energy Storage Systems. Verkkoinfo. Saatavissa: <https://process.honeywell.com/us/en/industries/renewable-and-energy-storage-solutions/bess>. Luettu 4.4.2023.

- 12 Solar Integration: Inverters and Grid Services Basics. Verkkoaineisto. Energy.gov. Saatavissa: <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-integration-inverters-and-grid-services-basics>. Luettu 22.4.2023.
- 13 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-tuotteet). Verkkoaineisto. Fingrid. 2017. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi/>. Luettu 22.4.2023.
- 14 attachments.pdf. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.eera-set.eu/component/attachments/?task=download&id=312>. Luettu 21.2.2023.
- 15 Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. Verkkoaineisto. BloombergNEF. 2022. Saatavissa: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>. Luettu 8.2.2023.
- 16 Xu B, Oudalov A, Ulbig A, Andersson G, Kirschen DS. Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. IEEE Trans Smart Grid. maaliskuuta 2018;9(2):1131–40.
- 17 Preger Y, Barkholtz HM, Fresquez A, Campbell DL, Juba BW, Romàn-Kustas J, ym. Degradation of Commercial Lithium-Ion Cells as a Function of Chemistry and Cycling Conditions. J Electrochem Soc. 9. tammikuuta 2020;167(12):120532.
- 18 Andrea D. Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Boston: Artech House; 2010. 290 s.
- 19 Linden D. Handbook of batteries. Verkkoaineisto. New York : McGraw-Hill; 2002. 1498 s. Saatavissa: <http://archive.org/details/handbookofbattery0000unse>. Luettu 27.4.2023.
- 20 Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-EN.pdf. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.victronenergy.com/upload/documents/Datasheet-GEL-and-AGM-Batteries-EN.pdf>. Luettu 27.4.2023.
- 21 Gel and AGM Batteries. Verkkoaineisto. Victron Energy. Saatavissa: <https://www.victronenergy.com/batteries/gel-and-agm-batteries>. Luettu 27.4.2023.
- 22 Top 10 Energy Storage Trends in 2023. Verkkoaineisto. BloombergNEF. 2023. Saatavissa: <https://about.bnef.com/blog/top-10-energy-storage-trends-in-2023/>. Luettu 8.2.2023.

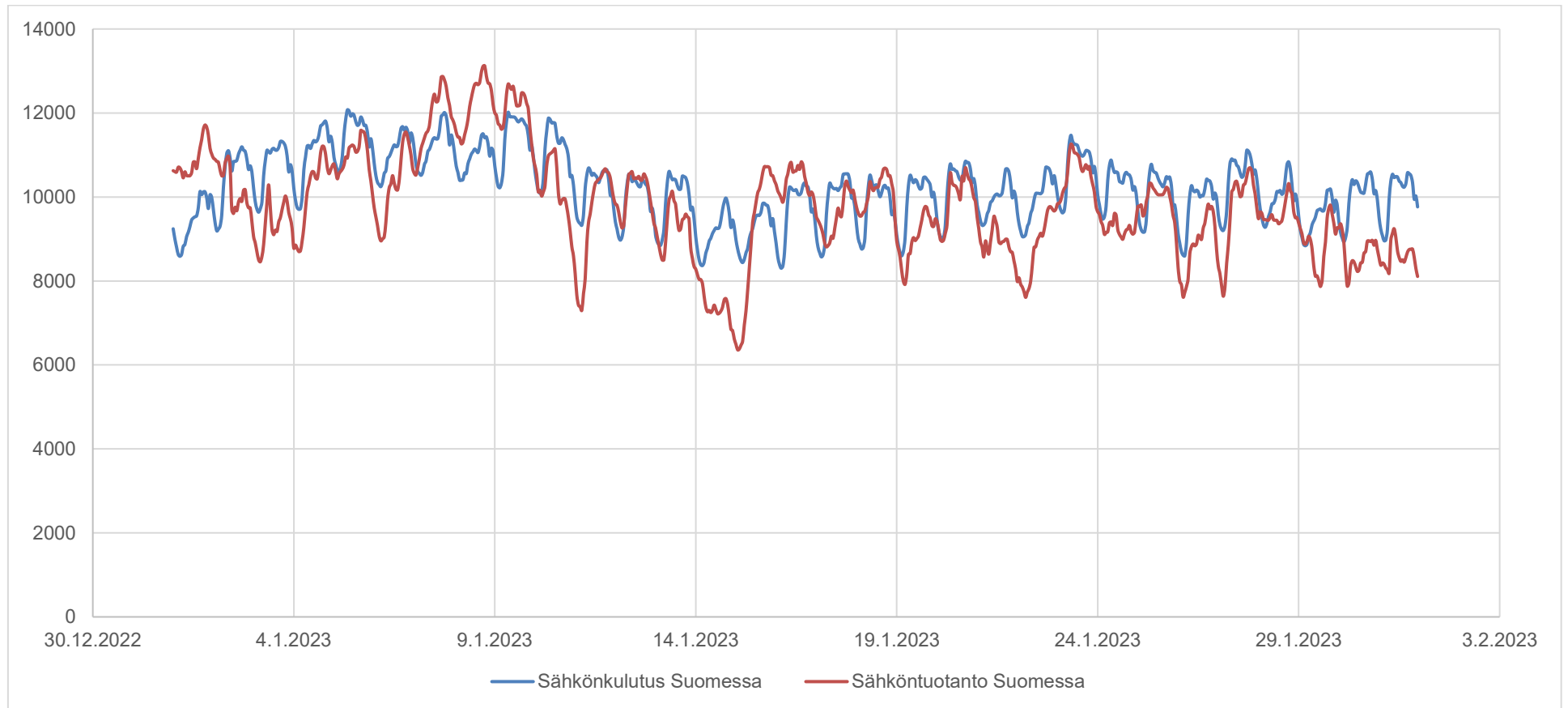
- 23 Ratkesiko sähköautojen akkujen ehkä suurin ongelma nyt? Kiinalaisvalmistaja laittoi suola-akun sähköautoon. Verkkoaineisto. Yle Uutiset. 2023. Saatavissa: <https://yle.fi/a/74-20027889>. Luettu 4.4.2023.
- 24 Rouhiainen N. Tämä autovalmistaja on patentoinut seuraavan sukupolven akun – ”Tekevät sähköautoista edullisempia”. Verkkoaineisto. Talouselämä. 2022. Saatavissa: <https://www.talouselama.fi/uutiset/tama-autovalmistaja-on-patentoinut-seuraavan-sukupolven-akun-tekevat-sahkoautoista-edullisempia/c453a320-1425-4ea5-9b73-ed440704e481>. Luettu 8.2.2023.
- 25 Ping W, Yang C, Bao Y, Wang C, Xie H, Hitz E, ym. A silicon anode for garnet-based all-solid-state batteries: Interfaces and nanomechanics. Energy Storage Mater. 1. syyskuuta 2019;21:246–52.
- 26 Solid State Battery - an overview | ScienceDirect Topics. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/solid-state-battery>. Luettu 27.4.2023.
- 27 Materialsgrp. English: Schematic of a Lithium Ion Battery. Verkkoaineisto. Saatavissa: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_of_a_Lithium_battery.jpg. Luettu 26.4.2023.
- 28 Mackenzie W. Global lithium-ion battery capacity to rise five-fold by 2030. Verkkoaineisto. 2022. Saatavissa: <https://www.woodmac.com/press-releases/global-lithium-ion-battery-capacity-to-rise-five-fold-by-2030/>. Luettu 26.4.2023.
- 29 Tesla, BYD accounted for 68% of LFP batteries deployed from Q1-Q3 2022. Verkkoaineisto. TESLARATI. 2022. Saatavissa: <https://www.teslarati.com/tesla-byd-68-percent-all-lfp-batteries-deployed-q1-q3-2022-report/>. Luettu 27.4.2023.
- 30 Battery Management Systems. Verkkoaineisto. Victron Energy. Saatavissa: <https://www.victronenergy.fi/battery-management-systems>. Luettu 27.4.2023.
- 31 Hinnoittelu - Cactos. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.cactos.fi/hinnoittelu>. Luettu 16.2.2023.
- 32 Tuote - Cactos. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.cactos.fi/tuote>. Luettu 27.4.2023.
- 33 Sähkön hinta. Verkkoaineisto. Energiateollisuus. Saatavissa: https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_hinta. Luettu 18.4.2023.

- 34 Lämmitätkö sähköllä? Verkkoyhtiö voi alkaa laskuttaa sinua kulutuspiikeistä. Verkkoaineisto. Yle Uutiset. 2017. Saatavissa: <https://yle.fi/a/3-9794329>. Luettu 18.3.2023.
- 35 Pienjännitetelesiirto | Helen. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.helensahkoverkko.fi/palvelut/tuotteet/pienjannite>. Luettu 18.3.2023.
- 36 Mikä on sähkön tehomaksu ja miten se muodostuu? Verkkoaineisto. Lahti Energia. 2021. Saatavissa: <https://www.lahtienergia.fi/ukk/mika-on-sahkon-tehomaksu-ja-miten-se-muodostuu/>. Luettu 18.3.2023.
- 37 Peak Shaving | What it is & how it works. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.next-kraftwerke.com/knowledge/what-is-peak-shaving>. Luettu 18.3.2023.
- 38 Pechmann A, Shrouf F, Chonin M, Steenhusen N. Load-shifting potential at SMEs manufacturing sites: A methodology and case study. *Renew Sustain Energy Rev.* 1. lokakuuta 2017;78:431–8.
- 39 Pohjoismainen sähköjärjestelmä ja liittynät muihin järjestelmiin. Verkkoaineisto. Fingrid. 2017. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liittynnat-muihin-jarjestelmiin/>. Luettu 4.4.2023.
- 40 Fingrid Reservit. Verkkoaineisto. 2021. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=mxuz-5Bz-IA>. Luettu 16.2.2023.
- 41 reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>. Luettu 16.2.2023.
- 42 5-reservitoimittajien-fcr-ehdot-ja-edellytykset_201009.pdf. Saatavissa: https://www.epressi.com/media/userfiles/107305/1602241683/5-reservitoimittajien-fcr-ehdot-ja-edellytykset_201009.pdf. Luettu 10.4.2023.
- 43 taajuuden-vakautusreservien-tekniset-vaatimukset-ja-todentaminen-1.pdf. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.epressi.com/media/userfiles/103273/1536313397/taajuuden-vakautusreservien-tekniset-vaatimukset-ja-todentaminen-1.pdf>. Luettu 22.4.2023.
- 44 reservien-tarjonta-ja-hankinta-teknologioittain-2018-2022.pdf. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.epressi.com/media/mediabankfiles/460/files/reservien-tarjonta-ja-hankinta-teknologioittain-2018-2022.pdf>. Luettu 16.2.2023.

- 45 Haanpää S. Tuulivoima tarvitsee tasapainoa ja siirtokykyä. Verkkoaineisto. Fingrid-lehti. 2023. Saatavissa: <https://www.fingridlehti.fi/tuulivoima-tarvitsee-tasapainoa-ja-siirtokyky/>. Luettu 22.4.2023.
- 46 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N, FCR-D ylös ja FCR-D alas), vuosimarkkinahankinta ja toteutuneet tuntikaupat. Verkkoaineisto. Fingrid. 2017. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/Taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi-vuosimarkkinahankinta-ja-toteutuneet-tuntikaupat/>. Luettu 22.4.2023.
- 47 Kuleshov D, Peltoniemi P, Kosonen A, Nuutinen P, Huoman K, Lana A, ym. Assessment of economic benefits of battery energy storage application for the PV-equipped households in Finland. J Eng. 2019;2019(18):4927–31.
- 48 Koskela J, Rautiainen A, Järventausta P. Using electrical energy storage in residential buildings – Sizing of battery and photovoltaic panels based on electricity cost optimization. Appl Energy. 1. huhtikuuta 2019;239:1175–89.
- 49 Seppänen B. Sähkövarasto teollisuuskiinteistössä. Verkkoaineisto. 2022. Saatavissa: <http://www.theseus.fi/handle/10024/753890>. Luettu 4.4.2023.
- 50 Order Megapack. Verkkoaineisto. Tesla. Saatavissa: <https://www.tesla.com/megapack/design>. Luettu 5.5.2023.
- 51 Choi J, Jo H, Han S. BESS life span evaluation in terms of battery wear through operation examples of BESS for frequency regulation. Teoksessa: 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia). 2017. s. 1–5.
- 52 Murray C. Nuvve to play 40MW of EV chargers and battery storage into Nordic frequency markets. Verkkoaineisto. Energy Storage News. 2023. Saatavissa: <https://www.energy-storage.news/nuvve-to-play-40mw-of-ev-chargers-and-battery-storage-into-nordic-frequency-markets/>. Luettu 26.4.2023.
- 53 Bradsher K. Why China Could Dominate the Next Big Advance in Batteries. The New York Times. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.nytimes.com/2023/04/12/business/china-sodium-batteries.html>. Luettu 4.5.2023.
- 54 Sähkötutuurien hinta syyskuussa 2023: 8.56 snt/kWh. Verkkoaineisto. 2022. Saatavissa: <https://vertaa-kilpailuttajat.fi/sahkofutuurien-hinta/>. Luettu 16.4.2023.

- 55 TVO - Olkiluoto 3 EPR:n säännöllinen sähköntuotanto on alkanut. Verkkoaineisto. Saatavissa: <https://www.tvoy.fi/ajankohtaista/tiedotteetporssitiedotteet/2023/olkiluoto3epnsaannollinensahkontuotantoonalkanut.html>. Luettu 16.4.2023.
- 56 Haanpää S. Pian helpottaa: tuulivoima kasvaa ydinvoimalan verran joka vuosi. Verkkoaineisto. Fingrid-lehti. 2022. Saatavissa: <https://www.fingrid-lehti.fi/pian-helpottaa-tuulivoima-kasvaa-ydinvoimalan-verran-joka-vuosi/>. Luettu 16.4.2023.
- 57 Gillin P. Will Battery Storage Solutions Replace Generators? Verkkoaineisto. Data Center Frontier. 2022. Saatavissa: <https://www.datacenter-frontier.com/special-reports/article/11427348/will-battery-storage-solutions-replace-generators>. Luettu 26.4.2023.

Sähkön kulutus ja tuotanto Suomessa megawattitunteina tunnissa, tammikuu 2023



Lähde: Fingrid tietoaineistot