



Karelia-ammattikorkeakoulu
Energia- ja ympäristötekniikka, insinööri (AMK)

Sähkövarasto energiayhteisössä

Petri Houni

Opinnäytetyö, toukokuu 2024

www.karelia.fi



Karelia
AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
toukokuu 2024
Energia- ja ympäristötekniikan koulutus

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
+358 13 260 600

Tekijä
Petri Houni

Nimeke
Sähkövarasto energiayhteisössä

Toimeksiantaja
Älykkäät energiayhteisöt -hanke

Tiivistelmä

Energiamurros ja siitä johtuva sähköenergian hintojen vaihtelu sekä säätökykyisen sähköntuotannon väheneminen luo tarvetta sähkökulutuksen joustoon sekä sähköverkkoa vakauttaville palveluille. Sähkövarastot ovat yksi tapa tuottaa kaivattua joustoa ja vakautta. Asunto-osakeyhtiön muodostama energiayhteisömalli voisi mahdollistaa suuret energiainvestoinnit, kuten sähkövarastot.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Älykkäät energiayhteisöt -hanke. Tavoitteena oli selvittää sähkövaraston mahdollisuuksia energiayhteisössä. Työ on tyypiltään tapaustutkimus, jossa tutkitaan sähkövaraston edellytyksiä kolmen taloyhtiön muodostamassa virtuaalisessa energiayhteisössä.

Työssä arvioitiin sähkövaraston taloudellisia edellytyksiä sekä reservimarkkinoilla toimimista. Aurinkosähkön omakäyttöasteen noston ja arbitraasin mahdollisuuksia tutkittiin simulaation kautta. Arbitraasilla tarkoitetaan rahallisen hyödyn saavuttamista sähkönhinnan vaihteluiden avulla. Opinnäytetyössä tarkasteltiin sähkövarastojen osalta vain akkuteknologiaa.

Työn tuloksista havaittiin, että sähkövarasto voi olla taloudellisesti kannattava investointi energiayhteisölle, mikäli sitä käytetään useisiin käyttötarkoituksiin. Sähkövaraston yhteiskäyttöä rajoittaa etenkin akkuteknologian hinta sekä verot ja siirtomaksut, jos käytetään sähkön jakelussa julkista jakeluverkkoa.

Kieli
suomi

Sivuja 41
Liitteet 2
Liitesivumäärä 2

Asiasanat
energiayhteisö, sähkövarasto, reservimarkkinat, energia-arbitraasi



THESIS
May 2024
Degree Programme in Energy and Environmental Engineering

Tikkarinne 9
80200 JOENSUU
FINLAND
+ 358 13 260 600

Author
Petri Houni

Title
Electrical Storage in Energy Communities

Commissioned by
Smart Energy Communities Project

Abstract

The energy transition and the resulting fluctuations in electricity prices and the decrease in adjustable electricity production create a need for flexibility in electricity consumption and for services that stabilize the electricity network. Electricity storages are one way to provide much-needed flexibility and stability. The energy community model formed by housing cooperative could enable large energy investments, such as electricity storage.

The thesis was commissioned by the Smart Energy Communities Project. The goal was to find out the possibilities of electricity storage in the energy community. The work is a case study in which the prerequisites for electricity storage are investigated in the virtual energy community formed by three housing cooperatives.

The work evaluated the financial conditions of the electricity storage and operations in the reserve market. The possibilities of raising the self-use rate of solar electricity and arbitrage were investigated through simulation. Arbitrage refers to achieving a financial benefit by means of electricity price fluctuations. In the thesis, only battery technology was considered in terms of electricity storage.

The main results of the thesis show that electricity storage can be an economically profitable investment, if it is used for several purposes. The shared use of electricity storage is limited especially by the price of battery technology and by taxes and transmission fees when using the public distribution network for electricity distribution.

Language
Finnish

Pages 41
Appendices 2
Pages of Appendices 2

Keywords
energy communities, electrical storage, reserve markets, energy arbitrage.

Sisältö

1	Johdanto	6
2	Energiamurros	7
3	Energiayhteisö	8
4	Sähköjärjestelmä	10
4.1	Sähköverkon tasapaino	11
4.2	Sähkömarkkinat	11
4.3	Reservimarkkinat	12
4.4	Aggregointi.....	14
4.5	Energian arbitraasi.....	15
5	Sähkövarastot.....	16
5.1	Lyijyakut.....	16
5.2	Litiumioniakut.....	17
5.3	Kehittyvät teknologiat.....	19
5.4	Sähkövarastojen turvallisuus	20
6	Opinnäytetyön tavoite, aineisto ja luotettavuus	21
6.1	Tutkimuskysymykset.....	21
6.2	Aineisto.....	22
6.3	Luotettavuus ja eettisyys	22
7	Menetelmät	23
7.1	Tutkimuksen luonne ja rajaus	24
7.2	Kannattavuuden arviointi	25
8	Toteutus.....	26
8.1	Energiavirtojen ja arbitraasin simulointi	26
8.2	Energiayhteisön kiinteistöt ja aurinkovoimala	29
8.3	Reservimarkkinoiden tulojen arviointi	31
9	Tulokset	32
9.1	Arbitraasikäyttö	32
9.2	Reservimarkkinoiden tulovirrat.....	33
9.3	Taloudellinen tarkastelu	34
10	Johtopäätökset	35
11	Pohdinta.....	36
11.1	Jatkokehitysmahdollisuudet	39
	Lähteet.....	40

Lyhenteet ja erityissanasto

FFR	Fast Frequency Reserve – nopea taajuusreservi
FCR-D	Frequency Containment Reserve – taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	Frequency Containment Reserve – taajuusohjattu käyttöreservi
aFRR	automatic Frequency Restoration Reserve – Automaattinen taajuudenpalautusreservi
mRR	manual Frequency Restoration Reserve – säätösähkömarkkina
kW	Kilowatti – tehon yksikkö, 1000 wattia
MW	Megawatti – tehon yksikkö, 1000 kilowattia
kWh	Kilowattitunti – energian yksikkö
kWp	Kilowattipiikki – tehon yksikkö, kuvataan aurinkosähkölaitteiston huipputehoa
Hz	Hertsi – värähtelytaajuuden mittayksikkö aaltoliikkeessä
Li-ion akku	Litiumioniakku

1 Johdanto

Kiihtyvä ilmastonmuutos, fossiilisten polttoainevarojen huventuminen sekä ilman saastuminen ajaa ihmiskuntaa siirtymään fossiilisista energianlähteistä uusiutuvien energianlähteiden käyttöön. Etenkin tuuli -ja aurinkoenergia ovat nostamassa merkitystään nykyisessä energiataloudessa. Menneillään olevaa suunnanmuutosta energiataloudessa kutsutaan energiamurrokseksi. (Brown 2015, 13.) Säästä riippuvaiseen uusiutuvaan energiaan siirtymisen myötä sähköntuotannon säädettävyys heikkenee, jolloin jouston merkitys kasvaa. Kaivattua joustoa sähkön kulutukseen ja tuotantoon voidaan tuottaa sähkövarastoilla. (Fingrid Oyj 2023b, 36.)

Energiamurros edistää sähköntuotannon hajautumista yksittäisistä isoista tuotantoyksiköistä kohti pienempiä tuotantoyksiköitä. Aurinkosähkön pientuotannon nousua viime vuosina voi kutsua jopa ilmiöksi. Aurinkosähkön pientuotannon, eli alle 1 MW:n tuotantolaitosten kapasiteetti oli vuoden 2022 lopussa 635 MW, kasvua vuodesta 2021 oli yli 60 % (Energiavirasto 2023).

Energiayhteisöt ovat melko uusi ja tuntematon käsite suomalaisessa energia-keskustelussa. Energiayhteisön käsitteellä tarkoitetaan yhteisöä, jonka toiminta perustuu yhteisten energiaressurssien hyödyntämiseen (Elenia & VTT 2024, 5). Vuonna 2021 säädetty valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta kevensi energiayhteisöihin kohdistuvaa sääntelyä ja mahdollisti hyvityslaskennalla toteutetun energiayhteisön, takamittaroinnilla toteutetun energiayhteisön sekä kiinteistörajat ylittävän energiayhteisön. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023, 16.) Tämä muutos paransi taloyhtiöiden asemaa sähköntuottajina. Taloyhtiöiden tuottaman sähkön jakaminen mahdollistui myös taloyhtiön asukkaiden kesken. Ennen lakimuutosta taloyhtiön tuottamaa sähköä oli mahdollista käyttää vain taloyhtiön yhteiseen sähkökulutukseen.

Opinnäytetyön toimeksiantaja toimi Älykkäät energiayhteisöt -hanke, jonka päämääränä on luoda uusia menetelmiä ja palveluita tulevaisuuden energiayhteisöille. Hankkeella on kaksi päätavoitetta: energiayhteisöjen toimintamallien kehitys ja energiayhteisötiedon ja -tietoisuuden lisääminen.

Opinnäytetyön tavoitteena on selvittää sähkövarastoiden käytön mahdollisuuksia ja rajoitteita sekä taloudellista kannattavuutta energiayhteisöjen toimintaympäristössä. Työn tietoperusta osuudessa käydään läpi aiheeseen liittyvät keskeiset käsitteet ja kartoitetaan saatavilla olevien akkuvarastoiden ominaisuudet, lainsäädännön suhtautuminen sähkövarastoihin energiayhteisössä. Tutkimuksen toteutuksen osiossa simuloidaan sähkövarastoiden soveltuvuutta energiayhteisöiden käytössä esimerkkitapauksen kautta ja tätä kautta pyritään osoittamaan sähkövaraston toimintaa. Simulaatiossa tarkastellaan energiavirtoja ja niiden käyttäytymistä eri skenaarioissa. Sähkövaraston soveltuvuutta taloudelliselta näkökulmalta tarkastellaan kannattavuuslaskennan kautta. Tässä tapaus- tutkimuksessa käsiteltävä energiayhteisö on tyypiltään hajautettu energiayhteisö, eli yhteisö, joka käyttää sähkön jakoon julkista jakeluverkkoa. Sähkövarastoteknologioiden osalta työ rajattiin käsittelemään ainoastaan sähkökemiallisia akustoja.

Opinnäytetyön tekijänä pidän aihealuetta mielenkiintoisena, sillä aihealueessa yhdistyy kaksi näkökulmaa: yksityishenkilön ja yhteiskunnan etu. Näillä saavutetaan taloudellista etua ja sähköverkon tasapainottavaa vaikutusta koko yhteiskunnan eduksi. Koen aiheen myös ajankohtaisena, koska energiamurroksen aiheuttama epävakaus sähkön hintatasossa etenkin viime vuosina on tehnyt energian omatuotannon sekä varastoinnin kiinnostavaksi ja potentiaaliseksi toiminnaksi myös yksityishenkilöiden näkökulmasta. Kommunikoiva energia -hanke suoritti energiayhteistyökyselyn taloyhtiöille vuonna 2021. Kyselyn tuloksista selviää, että pohjoiskarjalaisissa taloyhtiöissä suhtaudutaan positiivisesti sähkövarastoihin ja kulutusjoustoon. Tärkeinä seikkoina, jotka vaikuttaisivat sähkövaraston hankintaan, koettiin olevan taloudellinen kannattavuus ja sähkövarastojen tekninen toimivuus. (Kommunikoiva energia 2021.)

2 Energiamurros

Energiamurroksella tarkoitetaan suunnanmuutosta ihmiskunnan energiataloudessa. Ihmiskuntana aiemmin olemme siirtyneet puun poltosta hiilen ja öljyn polttoon, nyt siirrymme fossiilisista polttoaineista uusiutuviin energianlähteisiin. Energiamurroksessa ei kuitenkaan ole kysymys vain polttoaineista ja

energiantuotannosta. Se käsittää myös uudet tekniset ratkaisut, kuten älykkään sähköverkon, energiatehokkuuden ja energian varastoinnin välineet. (Brown 2015, 7.)

Euroopan Unionin tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteiden saavuttamiseksi energiantuotannolla on keskeinen rooli päästöjen vähentämiseksi, sillä 75 % kasvihuonepäästöistä on peräisin energiasektorilta. Euroopan parlamentti ja neuvosto on asettanut yleistavoitteen, jonka mukaan vuonna 2030 32 % energian kokonaisloppukulutuksesta täytyy olla peräisin uusiutuvista lähteistä. (Euroopan parlamentin neuvoston direktiivi 2023/2413, 1–2.)

Energiajärjestelmän siirtyessä uusiutuviin energiamuotoihin sähkövarastoiden rooli kasvaa, sillä useat uusiutuvan energian tuotantomuodot, kuten tuuli- ja aurinkovoima ovat riippuvaisia sääolosuhteista. Tämä johtaa tilanteeseen, jolloin energiantuotannon säädettävyyttä heikkenee verrattuna polttoon perustuvaan energiantuotantoon. (Elenia & VTT 2024, 29.)

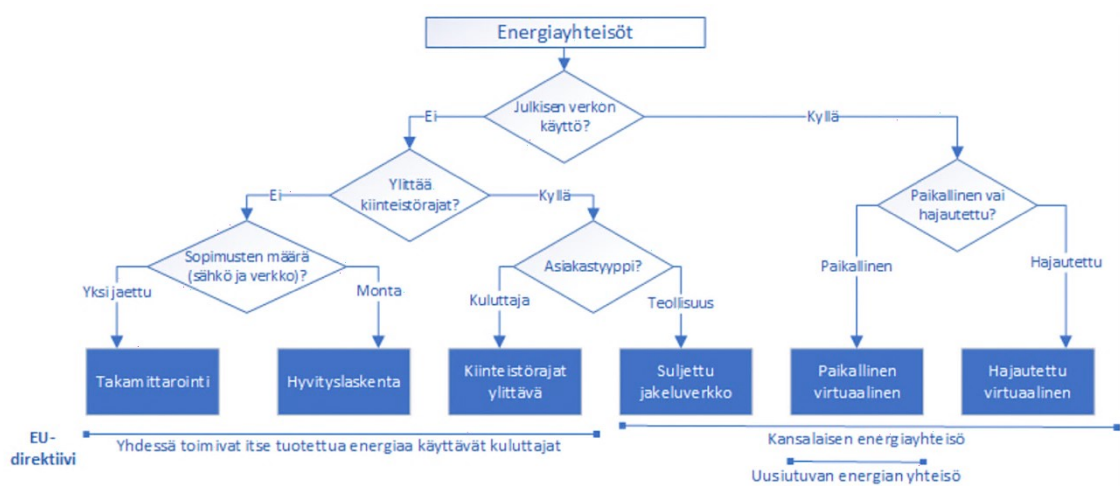
3 Energiayhteisö

Energiayhteisöllä viitataan jakamistalouden muotoon, jossa muodostetaan yhteisö, jonka jäsenet hyödyntävät yhteisiä energiaresursseja. Jaettavia energiaresursseja ovat tyypillisesti tuotantoyksiköt, kulutuskohteet ja sähkövarastot. Energiayhteisöt tekevät mahdolliseksi jäsenten energian tuotantoon liittyvien arvovalintojen tekemisen sekä taloudellisten tuottojen saavuttamisen. Esimerkiksi taloyhtiöiden sähkönkäyttäjille energiayhteisö mahdollistaa oman sähköntuotannon laajemman hyödyntämisen. (Elenia & VTT 2024, 5.)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivissä 2023/2413 mainitaan periaate, jonka mukaan jäsenvaltioiden on kannustettava sekä varmistettava tasapuoliset mahdollisuudet yhteisöille osallistua uusiutuvan energian sähkömarkkinoille tarjoamalla joustopalveluja kysyntäjouston ja varastoinnin avulla. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2023/2413, 15.)

Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta (12.8.2021/767) määrittää kansalaisten energiayhteisön oikeushenkilöksi, joka muodostuu tosiasiallista määräysvaltaa käyttävistä yhteisön jäsenistä tai osakkaista. Yhteisön jäseniä tai osakkaita ovat luonnolliset henkilöt, kunnat, muut paikallisviranomaiset tai yritykset. Paikallinen energiayhteisö tuottaa, kuluttaa, aggregoi, varastoi tai tarjoaa energiatehokkuuspalveluja, sähköauton latauspalveluita tai muita energiapalveluita osakkailleen. Varsinainen tarkoitus on tuottaa ympäristöön, talouteen ja sosiaaliseen yhteisöön liittyviä hyötyjä jäsenilleen. Paikallisen energiayhteisön sähkönkäyttöpaikkojen sähkön mittauksesta vastaa jakeluverkonhaltija. Energiayhteisön on rekisteröidyttävä sähkötoimitusten selvitystä varten paikallisen jakeluverkon haltijalle.

Energiayhteisöt voidaan jaotella paikallisiin ja hajautettuihin energiayhteisöihin (Kuvio 1). Paikalliset energiayhteisöt voivat olla kiinteistön sisäisiä tai kiinteistörajat ylittäviä energiayhteisöjä. Kiinteistön sisäisen energiayhteisön muodostavat samassa kiinteistössä toimivat tai asuvat tahot, jotka ovat yhteydessä jakeluverkkoon kiinteistön yhden liityntäpisteen kautta. Kiinteistörajat ylittävissä energiayhteisöissä tuotantopiste voi sijaita eri kiinteistöllä, mutta tuotanto siirretään omaa linjaa pitkin, mutta ei yleistä jakeluverkkoa käyttäen. (Elenia & VTT 2024, 8–9.)



Kuvio 1. Energiayhteisöjen luokittelu. (Tampereen yliopisto, Tampereen ammattikorkeakoulu & VTT. 2021.)

Hajautetut, eli virtuaaliset energiayhteisöt voidaan jakaa kahteen erilliseen luokkaan: paikallinen virtuaalinen energiayhteisö ja hajautettu virtuaalinen

energiayhteisö. Hajautetut energiayhteisöt eivät rajoitu yhteen kiinteistöön ja ne voivat käyttää sähkön jakelussa julkista jakeluverkkoa. Paikallisessa virtuaalisessa energiayhteisössä käyttökohteet sijaitsevat paikallisen jakeluverkon alueella, kun taas hajautetun virtuaalisen energiayhteisön käyttökohteet voivat sijaita eri puolilla Suomea. Virtuaalinen energiayhteisö mahdollistaa energian tuotanto- ja kulutusyksikön sijoittamisen kiinteistölle, joilla voi olla pitkäkin välimatka toisistaan. Virtuaaliselle energiayhteisömallille ei ole vakiintuneita tai säädettyjä malleja. Tämänhetkisen lainsäädännön mukaan virtuaalisen energiayhteisön jäsenet näyttäytyvät tavallisina asiakkaina verkkoyhtiöille ja muille sähkömarkkinoiden osapuolille. Lainsäädäntö ei kuitenkaan estä virtuaalisen energiayhteisön perustamista tai toimintaa. Sähkön myynnin ja kulutuksen netotus tällaisessa yhteisössä voidaan toteuttaa sähkönmyyjän tarjoamalla netotuspalvelulla. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023, 18.)

Sähköverovelvollisuus koskee muiden sähköntuottajien tapaan myös energiayhteisöjä. Sähköveroa ei tarvitse kuitenkaan maksaa, mikäli tuotantoteho on alle 100 kVA tai vuosituotanto on alle 800 000 kWh. Asunto-osakeyhtiöiden ei tarvitse myöskään maksaa verkkoon myytävästä sähköstä arvonlisäveroa, mikäli verkkoon myynti katsotaan satunnaiseksi ja määrä vähäiseksi. Hajautetussa energiayhteisössä, jossa sähkön jakamiseen käytetään julkista jakeluverkkoa, joudutaan tuotannosta maksamaan siirtomaksut ja verot. Sähkön myyjät voivat kuitenkin tarjota palvelua, missä toisaalla tuotettu sähkö voidaan huomioida toisen käyttöpaikan laskutuksessa, niin että siirtomaksuja ja veroja ei laskuteta. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023, 27–28.)

4 Sähköjärjestelmä

Energiamurroksen johdosta myös sähköverkon ja -markkinoiden on sopeuduttava muutokseen. Energiamurros on aiheuttanut tuotannon vaihtelua, suurien kulutuskohteiden lisääntymistä, siirtoyhteyksien kasvamista ja säätökykyisen tuotannon poistumista. Tämä aiheuttaa herkempää tasapainoa sähköverkossa ja reservien lisääntynyttä tarvetta sähkömarkkinoilla. (Fingrid Oyj. 2023a.)

4.1 Sähköverkon tasapaino

Sähkön tuotannon ja kulutuksen täytyy olla tasapainossa, jotta sähköverkko pysyy yllä. Sähköjärjestelmässä toimivat laitteet on suunniteltu toimimaan tietyllä taajuudella. Liian suuret taajuuden poikkeamat voivat pois kytkeä voimalaitoksia verkosta, jolloin seuraisi dominoefekti, joka kaataisi sähköverkon. (Fingrid Oyj 2023a.) Taajuus laskee, kun kulutus ylittää tuotannon ja nousee tuotannon ylitäessä kulutuksen. Sähköverkon nimellistaajuus on 50 Hz ja sen sallitaan vaihdella 49,9–50,1 Hz:n välillä. (Fingrid Oyj 2024a.)

Sähköverkon tasapainosta Suomessa vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj. Fingrid vastaa kulutuksen ja tuotannon tasapainottamisesta ottamalla käyttöön säätötarjouksia ylläpitämiltään säätömarkkinoilta sekä varaamalla reservejä, jotka ovat tuotantolaitoksen tai kulutusyksikön vapaata pätötehokapasiteettia. Näiden tasapainotuskeinojen lisäksi Suomessa on käytössä tehoreservijärjestelmä, jolla turvataan sähkön toimitusvarmuus tilanteissa, jossa sähkön kulutus ylittää suunnitellun sähkön hankinnan. Tehoreserveinä voivat toimia voimalaitokset ja sähkön kulutuksen joustoon kykenevät kohteet. (Fingrid 2024a.)

4.2 Sähkömarkkinat

Nord Pool on Pohjoismaiden sähköpörssi, jonka omistavat alueen kantaverkkoyhtiöt, mukaan lukien Suomen Fingrid Oyj. Sähköpörssi toimii kauppapaikkana sähkömarkkinoilla, mahdollistaen sähkön ostamisen ja myymisen alueen tuottajien ja ostajien välillä. Sähkön spot-, eli vuorokausimarkkinoilla sähkön hinta määräytyy kysynnän ja tarjonnan mukaan seuraavan päivän jokaiselle tunnille. Sähkön kulutus tai tuotanto voi kuitenkin vaihdella ennusteista, jolloin käydään myös päivän sisäistä kauppaa. (Fingrid & Energiateollisuus 2024, 10.)

Kuviossa 2 on esitetty sähkömarkkinoiden markkinapaikat, kaupankäynnin ajankohdat ja tuotteet. Vuorokausimarkkinoilla käydään joka päivä kauppaa seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille. Markkinatoimijat asettavat tarjouksensa sähkön tuotannosta ja kulutuksesta klo 13 mennessä. Sähköpörssit määrittelevät hinnan osto- ja myyntitarjousten ja siirtokapasiteettien perusteella. Suomi toimii vuorokausimarkkinoilla omana tarjousalueenaan. Sähkön toimitushetkellä

voi tapahtua äkillisiä muutoksia kulutuksessa tai tuotannossa, kuten säätilan muutokset tai laitevauriot. Tämä vaatii markkinoiden reagointia ja kaupankäyntiä tasapainon ylläpitämiseksi. Päivänsisäiset markkinat mahdollistavat tarkemman tuotanto- ja kulutussuunnittelun lähempänä toimitushetkeä. Ne toimivat tuntitasolla ja avautuvat vuorokausimarkkinan jälkeen. (Fingrid 2024b.)

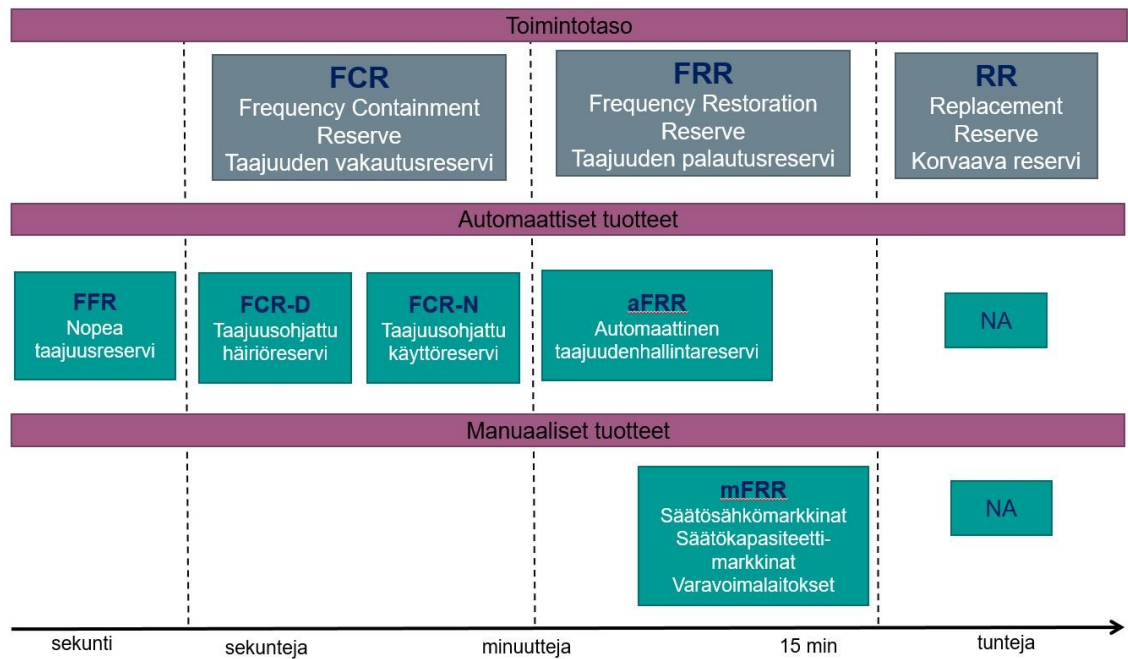


Kuvio 2. Sähkösäätömarkkinoiden markkinapaikat. (Fingrid 2024b.)

Kuluttajalle sähkön hinnan muutoksien merkitys riippuu sähkönmyyjän kanssa solmitusta sopimustyyppistä. Sopimustyyppi voi olla mm. kiinteähintainen ja määräaikainen, jolloin sähkön hinta ei vaihtele sopimuksen voimassaolon aikana tai sähköpörssin hintojen vaihteluun perustuva, yleisesti pörssisähkösopimukseksi kutsuttu sopimustyyppi. (Fingrid & Energiategollisuus 2024, 16–17.)

4.3 Reservimarkkinat

Säätösähkömarkkinoilla tarkoitetaan Fingridin ja muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden ylläpitämää säätösähkömarkkinaa, eli mFRR (*manual Frequency Restoration Reserves*) markkinaa. Lisäksi Fingrid ylläpitää muitakin reservimarkkinoita, kuten nopeaa taajuusreserviä FFR (*Fast Frequency Reserve*), taajuusohjattua käyttö- ja häiriöreserviä FCR-N, FCR-D (*Frequency Containment Reserve*) sekä automaattista taajuudenpalautusreserviä (aFRR). (Fingrid 2024b.) Nopeaa FFR -reserviä käytetään sähköverkon pienen inertian tilanteiden hallintaan, FCR-N ja FCR-D-reservejä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan ja aFRR -reserviä taajuuden palauttamiseksi normaalitasolle (Fingrid 2023c, 5–9).



Kuvio 3. Reservituotteet ja niiden aktivoitumisaika (Fingrid 2023d,4.)

Sähkövarastot soveltuvat toimimaan erityisesti nopeutta vaativilla markkinoilla, joilla vaadittu energiakapasiteetti on pienempi kuten FFR ja FCR-D-markkinoilla (Taulukko 1). Sähkövaraston toimimista reservimarkkinoilla rajoittaa myös säädön vähimmäiskoko, joka vaihtelee tuotteen mukaan 0,1-1MW välillä. Reservitoimittaja on vastuussa siitä, että energiaa riittää reservin ylläpitoon ja aktivointiin. (Fingrid 2023d, 5–10,23)

Reservituote	Minimitarjouskoko	Vähimmäismitoitus yhtäjaksoiselle aktivointikyvyille täydellä reserviteholla	Sähkövaraston soveltuvuus reservituotteisiin
FFR, nopea taajuusreservi	1 MW	5–30 s	Kyllä
FCR-D, taajuusohjattu häiriöreservi	1 MW	20 min	Kyllä
FCR-N, taajuusohjattu käyttöreservi	0,1 MW	1 h	Kyllä
aFRR, automaattinen taajuuden palautusreservi	1 MW	1 h	Ei
mFRR, säätösähkömarkkinat, säätökapasiteettimarkkinat	1 MW	1–3 h	Ei

Taulukko 1. Reservituotteiden minimitarjouskoot ja vähittäismitoitus yhtäjaksoiselle aktivointikyvyille täydellä reserviteholla. (Fingrid 2023c, 13-14,23.)

4.4 Aggregointi

Aggregoinnin avulla hajautetut sähköenergian varastointimenetelmät, kuten akkuvarastot mahdollistavat merkittävästi jousto- ja tasepalveluiden tarjoamisen sähköverkkoon. (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2023/2413, 15.) Aggregaattori on toimija sähkömarkkinoilla, joka kokoaa yhteen useiden eri asiakkaiden sähkökulutuksen, -tuotannon tai -varastoinnin muodostaen laajemman kokonaisuuden ja huolehtii tämän resurssin teknisestä hallinnasta kaupankäynnin mahdollistamiseksi eri markkinapaikoilla. Tämä mahdollistaa myös pienten asiakkaiden osallistumisen sähkömarkkinoille (Työ- ja elinkeinoministeriö 2018). Itsenäinen aggregaattori on toimija, jolla ei ole sidonnaisuuksia loppukäyttäjän avoimeen sähköntoimittajaan (Fingrid 2024c).

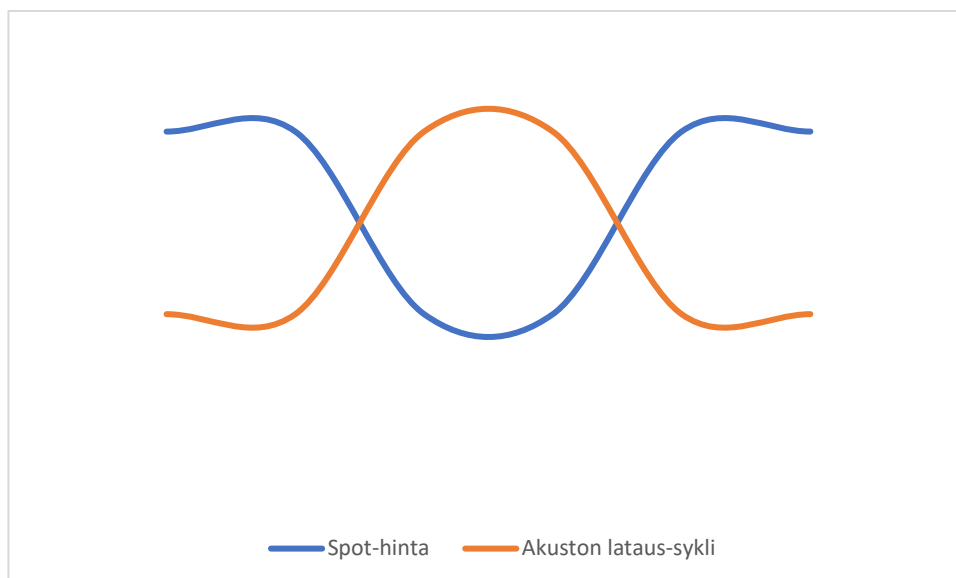
Aggregointi on sallittua kaikilla reservimarkkinoilla kuten on myös itsenäinen aggregointi pois lukien säätösähkömarkkinat (Kuvio 3). Säädön myyjä saa säätötarjouksen jättämisestä kapasiteettikorvauksen sekä aktivoiduista tarjouksista energiamaksun. FCR-D ja FFR-markkinoilla korvaus maksetaan ainoastaan kapasiteettikorvauksena, mutta FCR-N ja aFRR-markkinoilla maksetaan kapasiteettikorvauksen lisäksi myös energiamaksua. (Fingrid 2024c.)

FCR-D	FCR-N	FFR	aFRR kapasiteettimarkkina
<ul style="list-style-type: none"> • Itsenäinen aggregointi sallittu 1.1.2017 alkaen • Minimitarjouskoko 1 MW • Kapasiteettikorvaus reservoimittajalle • 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 reservoimittajalle • Energiamaksu ja tasepoikkeamakorjaus <ul style="list-style-type: none"> ➢ Säättöenergia korjataan ja korvataan (tasepoikkeaman hinnalla) kokonaisuudessaan reserviresurssin sähkömyyjän tasevastaavalle • Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Itsenäinen aggregointi sallittu 12.5.2020 alkaen • Minimitarjouskoko 1 MW • Kapasiteettikorvaus reservoimittajalle • 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 22.5.2023 alkaen. Malli väliaikainen, voimassa 28.5.2024 asti. • Minimitarjouskoko 1 MW <ul style="list-style-type: none"> ➢ Resurssija eri tasevastaavien taseesta ei voi yhdistellä samaan tarjoukseen. Minimitarjoukseen tulee täytyä saman tasevastaavan taseessa olevista resursseista. • Kapasiteettikorvaus reservoimittajalle • Energiamaksu ja tasepoikkeamakorjaus <ul style="list-style-type: none"> ➢ Säättöenergia korjataan ja korvataan (tasepoikkeaman hinnalla) kokonaisuudessaan reserviresurssin sähkömyyjän tasevastaavalle • Itsenäisellä aggregaattorilla ei ole tasevastaavaa. • Itsenäisen aggregaattorin malli aFRR kapasiteettimarkkinalla on väliaikainen ja malli tulee muuttumaan aFRR energiamarkkinan käyttöönoton myötä.
<p>Itsenäinen aggregointi ei ole vielä mahdollista mFRR-tuotteessa. Sen käyttöönotto mFRR ja aFRR energiamarkkinoilla vaatii kompensatiomallin kehityksen sekä tietojärjestelmämuutoksia.</p>			

Kuvio 3. Itsenäinen aggregointi Fingridin reservimarkkinoilla. (Fingrid 2024c.)

4.5 Energian arbitraasi

Sähköenergian hinnan vaihtelun hyödyntämistä taloudellisen tuoton tavoittamiseksi kutsutaan energian arbitraasiksi. Taloudellista tuottoa tavoitellaan prosessilla, jossa sähköenergiaa ostetaan, kun sähkön hinta on edullista ja myydään tai käytetään kulutuskohteessa, kun sähkö on kallista. Arbitraasia hyödyn-tääkseen täytyy tunnistaa markkinoiden hintojen vaihtelun toiminta. Tähän voidaan käyttää optimoinnin algoritmeja, jotka ottavat huomioon mm. markkinaen-nusteet sekä historialliset hintatiedot. (ClenTech Controls 2024.) Kuviossa 4 on esitetty yksinkertaistettu esimerkki arbitraasin hyödyntämisestä sähkövaraston avulla.



Kuvio 4. Yksinkertaistettu esimerkki arbitraasin hyödyntämisestä sähkövaraston avulla.

5 Sähkövarastot

Akuilla ja paristoilla tarkoitetaan sähkökemialliseen reaktioon perustuvaa energianlähdettä, joka muodostuu yhdestä tai useammasta sähköparista, eli kenosta. Akku on suunniteltu uudelleenladattavaksi, toisin kuin paristo. Kenno muodostuu elektrodeista, eli anodista, katodista sekä elektrolyytistä. (Linja-Aho 2022, 8–9.) Akun luovuttaessa energiaa anodilla tapahtuu hapetusreaktio ja katodilla pelkistymisreaktio, jolloin hapettunut aine luovuttaa elektroneja. Elektronien virratessa anodilta virtapiirin kautta katodille, muodostuu sähkövirta. (Motiva 2024.)

5.1 Lyijyakut

Lyijyaku on pitkään käytössä ollut akkuteknologia. Tyypillisesti lyijyakuilla on hyvä kustannussuorituskyky -suhde, mutta energiatiheys on taas pieni. Heikoutena on myös lyhyehkö käyttöikä sekä suorituskyvyn heikentyminen korkeissa ja matalissa lämpötiloissa. (IRENA 2017, 83.) Lyijyakkuja on tyypillisesti käytössä esimerkiksi ajoneuvojen käynnistysakkuina ja

aurinkosähköjärjestelmien akkuina. Lyijyakuissa elektrolyytinä käytetään laimeaa rikkihappoliuosta. (Linja-Aho 2022, 18.)

5.2 Litiumioniakut

Sony toi markkinoille ensimmäisen ladattavan litiumioniakun 1990-luvun alussa, ja siitä on tullut nopeasti tärkein akkuteknologia, jota käytetään laajasti eri käyttökohteissa. Li-ion akut ovat saavuttaneet suosionsa korkean energia- ja tehokkuuden, hyvän edestakaisen hyötysuhteen sekä pitkän käyttöiän ansiosta. Näiden akkujen koko on myös helposti skaalattavissa eri kokoluokkiin. Li-ion akkuja on tarjolla erilaisilla kemiallisilla ominaisuuksilla, eli akkukemioilla varustettuna, joilla on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. (IRENA 2017, 63.) Akkukemia-termillä viitataan yleensä akun katodin aktiiviaineeseen. Akun ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa myös muilla keinoilla, kuten elektrolyytin lisääaineistuksella. (Linja-Aho 2022, 30).

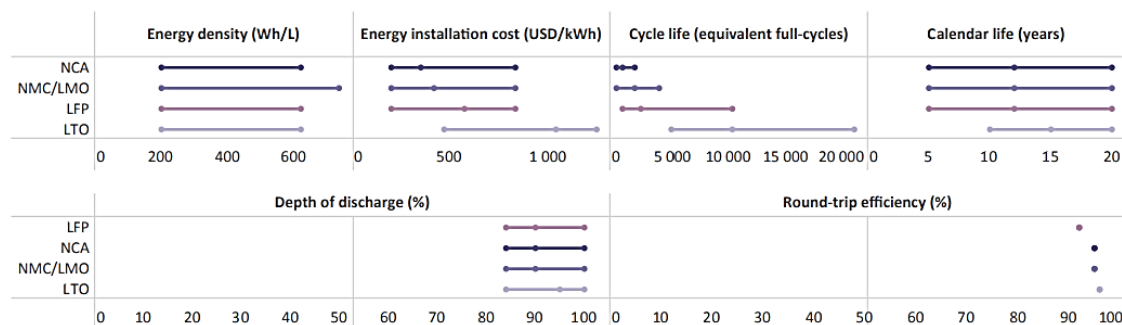
Litiumioniakkujen katodi koostuu virrankerääjänä toimivasta aktiivikalvosta sekä aktiiviaineesta, joka määrittää kyseisen akun akkukemian vaikuttaen akun ominaisuuksiin. Yleisimpiä käytettyjä aktiiviaineita ovat litiumrautafosfaatti (LFP), litiumkobolttioksidi (LCO), litiumnikkelioksidi (LNO), litiummangaanioksidi (LMO), nikkelikobolttialumiini (NCA), nikkelimagnaanikoboltti (NMC) ja litiumtitaani (LTO). Anodi muodostuu yleensä kuparilevystä ja grafiitista. (Linja-Aho 2022, 28.) Taulukossa 2 on esitetty eri akkukemioiden vaikutuksia akuston ominaisuuksiin.

Katodimateriaali (ly-henne)	Edut	Heikkoudet
Litiumrautaafosfaatti (LFP)	-Alhaisempi hankintahinta -Hyvä lämmönhallinta -Vaatii vähemmän harvinaisia maametalleja, kuten kobolttia	-Matalampi energiatiheys -Matalampi kennojännite
Litiumkobolttioksidi (LCO)	-Korkeahko energiatiheys -Matalahko hinta	-Turvallisuus -Vaatii runsaasti kobolttia
Litiumnikkelioksidi (LNO)	-LCO:ta parempi energiatiheys -Koboltiton	-Turvallisuus
Litiummangaanioksidi (LMO)	-Hyvä purkausteho -Magnaani edullisempää verrattuna kobolttiin	-Matala syklinkesto
Litiumkobolttialumiini (NCA)	-Korkea energiatiheys	-Kapasiteetin heikentyminen korkeissa lämpötiloissa -Heikohko syklinkestävyys -Lämpökarkaus alttius
Nikkelimagnaanikoboltti* (NMC)	-Suuri energiatiheys -Hyvä virranantokyky -Kohtuullisen turvallinen	
Litiumtitaani** (LTO)	-Turvallinen -Erinomainen syklinkesto	-Heikohko kennojännite -Korkea hinta -Huono ominaisenergia ja energiatiheys
*Nikkelimagnaanikoboltti -akun ominaisuudet ovat säädettävissä ja määräytyy vahvasti nikkelin, mangaanin ja koboltin suhdetta muuttamalla. **Litiumtitaaniakku nimetty muista poiketen anodimateriaalin mukaan.		

Taulukko 2. Eri katodimateriaalien etuja ja heikkouksia (Linja-Aho 2022, 32–25).

Li-ion akkujen elinikää voidaan arvioida syklikeston (*cycle life*) ja kalenterikäntymisen (*calendar life*) kautta. Syklikesto määrittää, kuinka monta täyttä lataus-purkaussykliä akun voi odottaa kestävän. Syklikeston määrittämiselle ei ole käytössä akkuvalmistajia sitovaa standardia, mutta akkuvalmistajat yleisesti määrittelevät käyttöiän lopun olevan silloin, kun kapasiteetti on alentunut 80 %:iin alkuperäisestä. (Linja-Aho 2022, 24.) Akut ikääntyvät myös vaikka ne

olisivat vähällä käytöllä. Tätä aikaan perustuvaa ikääntymistä arvioidaan vuosisissa. Akuston syklinen elinikä vahvasti akkukemiasta riippuvaista (Kuvio 5).



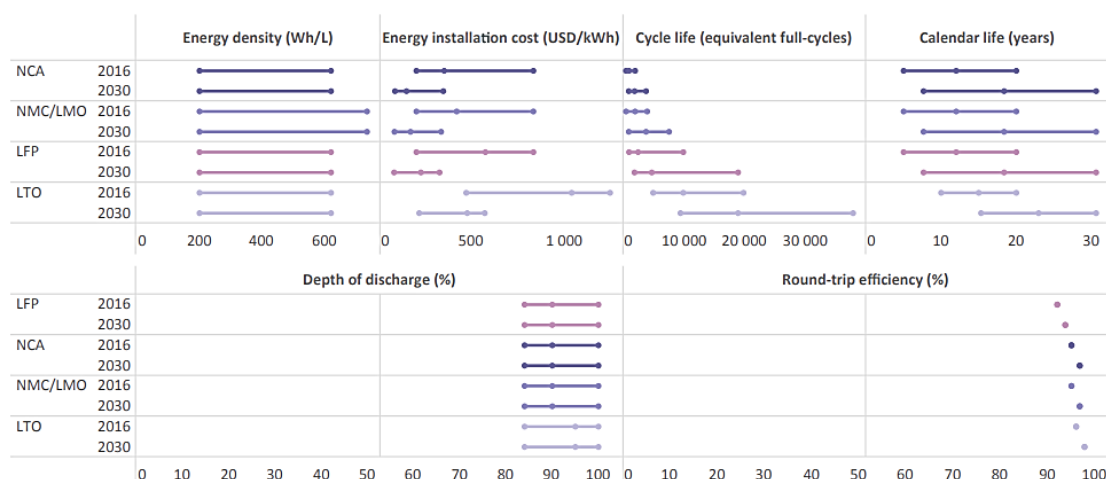
Kuvio 5. Eri akkujen ominaisuuksia ja hintatasoja. (IRENA 2017, 68.)

Suomessa litiumakkuja säätelevä lainsäädäntö koostuu Euroopan komission paristo- ja akkudirektiivistä (2006/66/EY), komission asetuksista (EU) N:o 1103/2010 ja N:o 493/2012 ja Valtionneuvoston asetuksesta paristoista ja akuista (520/2014). (Pitkämäki, Kontiokari, Päälyssaho, Brockl & Raivio 2017, 14.) Sähkömarkkinalaissa 588/2013 määrätään, että verkonhaltijan on mahdollistettava sähkövarastoiden liittäminen verkkoon. Verkonhaltijan on myös taattava kulusjouston ja energiavarojen edellyttämien palveluiden saatavuus.

5.3 Kehittyvät teknologiat

Toimivassa akussa täytyy yhdistyä monta ominaisuutta, kuten lataus-purkaus-teho, syklinesto ja turvallisuus, jotta se on soveltuva kaupalliseen käyttöön. Monissa uusissa ja mullistaviksi kuvailuissa akkuteknologioissa jokin näistä ominaisuuksista on saatu kehitettyä edelle muita, mutta akku voi olla muilta ominaisuuksiltaan keskinkertainen. Uusien ja mullistavien akkuteknologioiden markkinoille saattaminen ei siis ole nopea, eikä yksinkertainen prosessi. (Linja-Aho 2022, 134.)

Nykyisien litiumioniakkujen teknologiaa kuitenkin hiotaan jatkuvasti paremmaksi. Kuvio 6 voi havaita, että Li-ion teknologian ja valmistusprosessien kehittyessä hintatason ja suorituskyvyn odotetaan paranevan kaikilla yleisillä akkukemioilla vuoteen 2030 mennessä. Suurimpien muutoksen odotetaan kohdistuvan akkujen hintaan ja elinikään. (IRENA 2017, 78)



Kuvio 6. Litiumioniakkujen ominaisuudet ja hintatasot vuosina 2016 ja 2030 (IRENA 2017, 78)

5.4 Sähkövarastojen turvallisuus

Sähkövaraston turvallisuuden näkökulmasta suurin riski on tulipalon riski. Erityisesti Li-ion-akkuihin kohdistuva tulipalon kohonnut riski liittyy ”*thermal runaway*”, eli lämpökarkaamis -ilmiöön, jolla viitataan akun sisältämien kemikaalien hajomiseen, syttymiseen ja voimakkaaseen paloon akun lämpötilan kohotessa. Akkujen sisältämät kemikaalit voivat myös reagoida hapen kanssa ja palaa hyvin korkealla lämmöllä. (Pitkämäki, Kontiokari, Päälyssaho, Brockl & Raivio 2017, 9.) Li-ion akun lämpötilan noustessa 130–150°C lämpötilaan akun katodimateriaali alkaa hajota, jolloin seuraa eksoterminen reaktio, joka synnyttää hapetta. Tämän syyn takia paloa ei voi sammuttaa perinteisiä sammutusvälineitä käyttäen. Tulipalotilanteessa Li-ion akusta voi vapautua ilmaan myrkyllisiä palokaasuja sekä etenkin suuri jännitteisissä akuissa voi ilmetä sähköiskun- ja valokaarenpaara. (Linja-Aho 2022, 75–76.)

Akkupalon riskiä voidaan vähentää erilaisilla toimenpiteillä ja järjestelmillä. Tällaisia toimenpiteitä ja järjestelmiä ovat mm. BMS (*battery management system*), sulakkeet, riittävä suojaus kolhuilta ja lämmönhallintajärjestelmät. Myös tila, jossa sähkövarasto sijaitsee, on tärkeä palo-osastoida. (Pitkämäki ym. 2017, 9,74.)

BMS on akustonvalvontajärjestelmä, joka estää akun yllilatauksen ja liiallisen purkamisen sekä ohjaa akun lämmönhallintajärjestelmää. Järjestelmä perustuu akun ja yksittäisten kennojen jännitteen ja virran mittaukseen sekä lämpötilan seuraamiseen. Arvojen poiketessa järjestelmä voi rajoittaa akun lataamista ja purkamista, säätää lämpötilaa tai kytkeä akun pois käytöstä. BMS ehkäisee akuihin liittyviä riskejä, kuten tulipaloja ja sähkötapaturmia, mutta myös lisää akun elinikää. (Gabbar, Othman & Abdussami 2021, 7–8.)

6 Opinnäytetyön tavoite, aineisto ja luotettavuus

Opinnäytetyön ytimessä on sähkövarastot ja toimintaympäristönä energiayhteisö. Työssä pyrittiin kahden tutkimuskysymyksen pohjalta selvittämään sähkövaraston mahdollisimman suuren hyödyn tavoittamisen keinoja sekä arvioimaan järjestelmän taloudellisia edellytyksiä. Työn tavoitteena oli tuottaa vastauksia näihin tutkimuskysymyksiin mahdollisimman tarkasti ja totuudenmukaisesti.

6.1 Tutkimuskysymykset

1. Miten saavutetaan suurin hyöty sähkövarastosta energiayhteisössä?

Ensimmäisen tutkimuskysymyksen avulla opinnäytetyössä selvitettiin keinoja maksimoida sähkövaraston käyttöä energiayhteisössä, kuten varaston oikea-aikainen lataaminen ja purkaminen, varaston koon optimointi suhteessa energiantarpeeseen ja joustavuuden maksimointi.

2. Onko sähkövarasto taloudellisesti kannattava energiayhteisössä?

Toisella tutkimuskysymyksellä pyrittiin arvioimaan sähkövaraston taloudellista kannattavuutta energiayhteisön näkökulmasta, ottamalla huomioon investointikustannukset, operatiiviset kustannukset ja mahdolliset taloudelliset hyödyt, kuten energiansäästö ja tulot sähkön myynnistä.

6.2 Aineisto

Opinnäytetyössä käytettiin aineistona vuoden 2023 pörssisähkön hintatilastoa ja kolmen taloyhtiön sähkönkulutustietoja. Taloyhtiöiden sähkön kulutustietoja käytettiin energiavirtojen simulointiin. Sähkönkulutustiedot eivät ole julkista tietoa ja tämän takia taloyhtiöt ovat työssä nimettöminä. Toimeksiantaja vastaa kulutustietojen keruusta ja on saanut luvan niiden käyttöön.

Opinnäytetyön toisen tutkimuskysymyksen, eli taloudellisen kannattavuuden arviointiin käytettiin vuoden 2023 sähkön hintatilastoja, reservituotteiden hankintamääriä ja -hintoja sekä taloyhtiöiden sähkön kulutustietojen pohjalta tehdyn energiavirtojen simuloinnin tuloksena saatuja tietoja. Vuoden 2023 hintatilastot ovat ajantasaisimpia saatavilla olevia kokonaisen vuoden kattavia tietoja. Reservimarkkinoilta saatavien tulojen arviointiin käytettiin Fingridin verkkosivuilta saatavia reservituotteiden hankintamääriä ja keskiarvohintoja vuodelta 2023.

6.3 Luotettavuus ja eettisyys

Opetus- ja kulttuuriministeriön asettaman tutkimuseettinen neuvottelukunta on laatinut kansallisen ohjeen hyvästä tieteellisestä käytännöstä (HTK) vuodesta 1994. Ohjeen tavoitteena on edistää hyvää tieteellistä käytäntöä ja estää sen loukkauksia kaikilla tieteenaloilla. Tällä hetkellä voimassa oleva ohjeistus on laadittu vuonna 2022 ja siihen on voinut sitoutua vuodesta 2023 lähtien. Ohjeistuksen mukaan hyvän tieteellisen käytännön peruseriaatteet ovat luotettavuus, rehellisyys, arvostus ja vastuunkanto. Peruseriaatteet pohjautuvat eurooppalaiseen tutkimuseettiseen ohjeistukseen. (Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2023, 6,11.) Tutkimusaineistoa käsiteltäessä on noudatettava tietosuojalainsäädäntöä sekä luottamuksellisuuteen ja vaitioloon liittyviä velvoitteita. Hyvään tieteelliseen käytäntöön kuuluu edistää aineiston avoimuutta ja jatkokäyttöä mahdollisuuksien mukaan. (Tutkimuseettinen neuvottelukunta 2023, 13–14.)

Karelia-ammattikorkeakoulu on sitoutunut noudattamaan toiminnassaan kyseistä ohjetta hyvästä tieteellisestä käytännöstä (Karelia-ammattikorkeakoulu 2024). Sitoudun opinnäytetyön tekijänä ja Karelia ammattikorkeakoulun

opiskelijana noudattamaan HTK:ssa esiteltyä hyvää tieteellistä käytäntöä ja sen peruseriaatteita opinnäytetyön teossa.

Opinnäytetyössä ei käsitellä henkilötietoja, eikä aineistona käytettäviä tietoja yksilöidä koskemaan tiettyjä taloyhtiöitä. Työssä hyödynnettävä aineisto vastaa nykyaikaan sovellettavaa tietoa ja aineisto pyritään keräämään ajankohtaisista lähteistä. On kuitenkin mahdollista ja jopa todennäköistä, että teknologioiden kehittyessä ja energiamurroksen edetessä kannattavuuslaskennat eivät ole enää relevantteja vuosien päästä. Sähkön hintataso on ollut viime vuosina hyvin ailahteleva ja tulevaisuuden hintatasoa on vaikea ennakoida. Laskelmat pyrittiin kuitenkin toteuttamaan niin, että ne ovat todennettavissa ja toistettavissa eri kohteisiin ja tilanteisiin.

Tällä opinnäytetyöllä ei ole rahoituslähteitä, eikä muita sidonnaisuuksia, jotka vaikuttaisivat työn luotettavuuteen tai eettisyyteen. Kaupallisia ratkaisuja, kuten eri kaupallisia toimijoita ja tuotteita pyrittiin arvioimaan objektiivisesti ja neutraalisti.

7 Menetelmät

Tässä luvussa esitetään työn menetelmät ja laskentatavat, joilla asetettuihin tutkimuskysymyksiin pyrittiin työssä vastaamaan. Menetelmiä olivat energiavirtojen mallinnus, kannattavuuden arviointi ja reservimarkkinoiden tulojen arviointiin käytettävä laskentakaava.

7.1 Tutkimuksen luonne ja rajaus

Tutkimuksen ja tutkimuskysymysten luonne voidaan nähdä osin kartoittavana ja osin kuvailevana. Tutkimuksessa pyritään selvittämään vähän tunnettuja ilmiöitä, kuten tässä tapauksessa sähkövarastojen soveltuvuutta energiayhteisöjen käytössä. Hirsjärven, Remeksen & Sajavaaran (2007, 134) mukaan tällainen tutkimuskysymys on luonteeltaan kartoittava, sillä siinä etsitään uusia näkökulmia ja pyritään selittämään vähän tunnettuja ilmiöitä. Toisen tutkimuskysymyksen luonne on enemmän kuvaileva. Kannattavuuslaskennan kautta arvioidaan dokumentoidusti ja mahdollisimman tarkasti ilmiön keskeisiä piirteitä taloudellisesta näkökulmasta. Luonteeltaan kuvaileva tutkimus esittää tarkkoja kuvauksia tapahtumasta ja pyrkii dokumentoimaan ilmiön keskeiset piirteet (Hirsjärvi ym. 2007, 135).

Opinnäytetyö on luonteeltaan tapaustutkimus, sillä siinä hyödynnetään yksittäistä tapausta koskevaa aineistoa, eli olemassa olevien kolmen taloyhtiön kulu-
tuslukemia. Hirsjärven ym. (2007) mukaan tapaustutkimuksella (*case study*) pyritään tuottamaan yksityiskohtaista tietoa yksittäisistä tapauksista tai rajatusta joukosta tapauksia. Tapaustutkimukselle tyypillisiä piirteitä ovat mm. yksittäisen tapauksen valinta ja sen tutkiminen suhteessa ympäristöönsä. (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2007,130.) Tapaustutkimusanalyysi ei niinkään pyri ilmiön yleistettävyyteen, vaan että tuloksia voidaan soveltaa laajemmassa kontekstissa tai siirtää toiseen tapaukseen (Jyväskylän yliopisto, 2015).

Opinnäytetyössä on paljon kvantitatiiviselle, eli määrälliselle tutkimukselle ominaisia piirteitä, sillä aineisto koostuu pääosin kulutuslukemista ja sähkön hintatiedoista. Näiden pohjalta simuloimalla ja taloudellista kannattavuutta arvioimalla saadaan vastauksia asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Kvantitatiiviselle tutkimukselle keskeisiä piirteitä on, että havaintoaineisto soveltuu määrälliseen, eli numeeriseen mittaamiseen ja että muuttujat ovat muodostettavissa taulukkomuotoon. Keskeisenä piirteenä voidaan nähdä myös johtopäätösten teon mahdollisuus tilastolliseen analyysiin perustuen. Kvantitatiiviselle tutkimukselle on tyypillistä käsitteiden määrittely ja johtopäätökset aiemmista tutkimuksista (Hirsjärvi, Remes & Sajavaara 2007, 131–132.)

Työ rajattiin koskemaan sähkönvarastoinnin menetelmänä ainoastaan sähkökemiallisia akkuvarastoja. Opinnäytetyön toteutusosio on rajattu käsittelemään energiayhteisöjen eri luokittelusta virtuaalista energiayhteisöä.

7.2 Kannattavuuden arviointi

Sähkövarasto on energiayhteisölle arvokas investointi, joten on tärkeää selvittää taloudellinen kannattavuus ennen investointia. Investoinnin taloudellisen kannattavuuden arviointiin opinnäytetyössä käytettiin nykyarvo- ja takaisinmaksuajanmenetelmää.

Kannattavuuslaskennan lähtötiedoiksi selvitettiin arvio investoinnin kustannuksista, kuten sähkövaraston ja tarvittavien muiden komponenttien hankintahinta, sähkövaraston taloudellinen pitoaika, saatavat tulot tai säästöt sekä laskentakorkokanta. Taloudellisella pitoajalla tarkoitetaan ajanjaksoa, kuinka pitkään investoinnin oletetaan pysyvän käytössä (Eklund & Kekkonen 2016, 138). Tässä tapauksessa taloudellinen pitoaika määräytyy akkujärjestelmän syklisen tai kalenterieliniän perusteella riippuen kumpi osoittautuu rajoittavaksi tekijäksi.

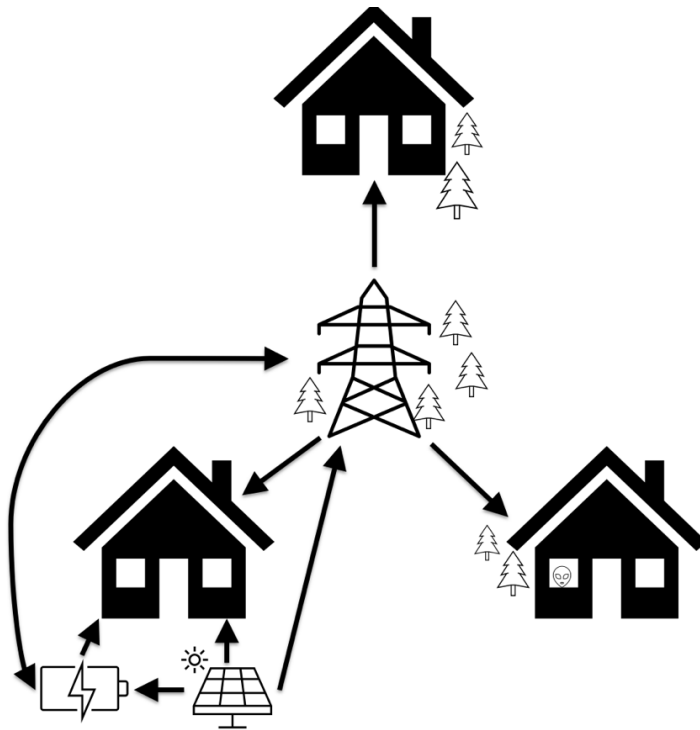
Nykyarvomenetelmää käytettäessä huomioidaan rahan aika-arvo, jolloin menot ja tuotot tuodaan nykyhetkeen, eli diskontataan valittua korkokantaa käyttäen. Ilman laskentakorkokantaa investointi saattaisi näyttäytyä liian kannattavana, jos sitä arvioitaisiin ainoastaan nettotuottojen perusteella. Investointi on kannattava, mikäli tulevat nettotuottojen yhteismäärä on tasan tai ylittävät alkuperäisen investoinnin. (Eklund & Kekkonen 2016, 139).

Takaisinmaksuajan laskenta on yksinkertainen menetelmä arvioida investoinnin kannattavuutta. Takaisinmaksuajan laskennan tuloksena saadaan aikamäärä, jolloin investointi on tuottanut niin paljon nettotuottoja, kun mitä investointi on kustantanut. Jos takaisinmaksuaika on pidempi, kuin mitä investoinnin odotettu pitoaika, on investointi kannattava. Mikäli takaisinmaksuaika on taas lyhyempi, kuin mitä se on hyödynnettävissä, investointi tuottaa tappiota. (Eklund, Kekkonen 2016, 144).

$$\text{Takaisinmaksuaika} = \frac{\text{investoinnin hankintameno}}{\text{vuotuinen nettotuotto}}$$

8 Toteutus

Opinnäytetyön ytimessä oli energiayhteisön eri energiavirtojen mallinnus. Mallinnettavia energiavirtoja on havainnollistettu kuvassa 1. Näitä energiavirtoja mallinnettiin tarkoitusta varten luodulla simulaatiotyökalulla. Reservimarkkinoilta saatavia tuloja arvioitiin Fingridin laskentakaavalla. Luvussa 8.2 esitellään tapaustutkimuksen kohde ja kohteen energiantuotanto ja -käyttö.



Kuva 1. Havainnekuva energiayhteisön energiavirroista.

8.1 Energiavirtojen ja arbitraasin simulointi

Sähkövaraston toimivuutta arbitraasi ja aurinkosähkön varastona energiayhteisössä pyrittiin osoittamaan opinnäytetyötä varten luodulla Excel-pohjaisella simulointityökalulla (Kuva 2). Simulaatiossa on oletettu energiayhteisön

hyödyntävän pörssisähkötyypistä sähkösopimusta, joka mahdollistaa energian arbitraasin hyödyntämisen.

Kohde				Aurinkosähköjärjestelmä															
Kokonaiskulutus		333653 kWh		Aurinkosähköjärjestelmä		100 kWp													
Tuntikohtainen kulutus min.		13 kWh/h		Tuotanto		102014 kWh/a													
Tuntikohtainen kulutus max.		111 kWh/h		Suora omakäyttö		72359 kWh/a													
Verkosta suoraan käyttöön sähköä		88894 kWh/a		Suora omakäyttö		70,9 %													
Akku				Tuotannon ylijäämä		29655 kWh/a													
Akun max. purkausteho		100 kW		Akustoon ladattava ylijäämä		8050 kWh/a													
Akun max. latausteho		100 kW		Akkuun ladattavan ylijäämän osuus tuotannosta		7,9 %													
Akuston käytössä oleva kapasiteetti		200 kWh		Verkkoon myytävä ylijäämä		21605 kWh/a													
Akuston kokonaiskapasiteetti		220 kWh		Verkkoon myytävän ylijäämän osuus tuotannosta		21 %													
Akustolle suotuisa max. SOC		100 %		Tulokset															
Akustolle suotuisa min. SOC		10 %		Nettosästä		7 907 €													
Akun edestakainen hyötysuhde		0,95		Sykliä		863 kpl													
		95 %		Akun elinikä		9,3 vuotta													
Syklinen elinikä		8000 sykliä		Arbitraasi		7 444,78 €													
Akusta purettu energia		172400 kWh		Aurinkosähkön vararointi		462,22 €													

Ajan kohta, d/h	Kulutus, kWh	Spot snt/kWh	Ladataan / puretaan verkosta	Tuotanto, kWh	Tuotannon ylijäämä, kWh	Tuotannon ylijäämä akkuun, kWh	Tuotannon ylijäämä myynti, kWh	Verkosta akkuun, kWh	Akkua ladataan yhteensä, kWh	Lataushäviö, kWh	Puretaan akusta, kWh	Akun SOC %	Akkua varattu sähköenergia, kWh	Akkua ladattua tuotannon ylijäämän arvo, €	Verkosta ladattua sähkön hinta, €	Akusta purettua sähkön hinta, €
1.1.2021 0:00	33,6	0,22	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
1.1.2021 1:00	32,0	0,15	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
1.1.2021 2:00	31,2	0,01	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
1.1.2021 3:00	30,5	0,01	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
1.1.2021 4:00	28,3	0,01	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
1.1.2021 5:00	28,8	0,01	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	50 %	100,00	- €	0,01 €	- €
1.1.2021 6:00	31,5	0,01	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	100 %	200,00	- €	0,01 €	- €
1.1.2021 7:00	36,4	0,06	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 8:00	38,4	0,22	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 9:00	45,8	0,34	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 10:00	38,8	0,49	VARAA	1,64	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 11:00	49,8	0,67	PURKAA	1,92	0,00	0	0,00	0	0	0,00	100	50 %	100,00	- €	- €	0,67 €
1.1.2021 12:00	53,1	0,67	VARAA	1,36	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	100 %	200,00	- €	0,70 €	- €
1.1.2021 13:00	66,0	0,62	VARAA	1,07	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 14:00	57,5	1,95	VARAA	0,03	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 15:00	65,9	2,65	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 16:00	60,3	4,02	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 17:00	66,7	5,06	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
1.1.2021 18:00	65,4	5,97	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	100	50 %	100,00	- €	- €	5,97 €
1.1.2021 19:00	55,8	5,90	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	100	0 %	0,00	- €	- €	5,90 €
1.1.2021 20:00	49,5	5,29	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
1.1.2021 21:00	45,9	4,91	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
1.1.2021 22:00	39,1	5,06	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	50 %	100,00	- €	5,31 €	- €
1.1.2021 23:00	33,0	3,85	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	100 %	200,00	- €	4,04 €	- €
2.1.2021 0:00	31,2	6,37	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	100	50 %	100,00	- €	- €	6,37 €
2.1.2021 1:00	29,1	5,68	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	100	0 %	0,00	- €	- €	5,68 €
2.1.2021 2:00	32,5	5,81	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	0 %	0,00	- €	- €	- €
2.1.2021 3:00	30,2	4,86	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	50 %	100,00	- €	5,10 €	- €
2.1.2021 4:00	27,9	5,51	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	100 %	200,00	- €	5,79 €	- €
2.1.2021 5:00	29,1	7,78	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
2.1.2021 6:00	32,0	11,28	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
2.1.2021 7:00	32,5	15,20	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
2.1.2021 8:00	43,2	16,06	VARAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €
2.1.2021 9:00	42,9	16,18	PURKAA	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0,00	100	50 %	100,00	- €	- €	16,18 €
2.1.2021 10:00	46,0	16,02	PURKAA	1,03	0,00	0	0,00	0	0	0,00	100	0 %	0,00	- €	- €	16,02 €
2.1.2021 11:00	52,6	15,77	VARAA	1,56	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	50 %	100,00	- €	16,56 €	- €
2.1.2021 12:00	48,1	15,88	VARAA	1,56	0,00	0	0,00	100	100	5,00	0	100 %	200,00	- €	16,67 €	- €
2.1.2021 13:00	53,0	15,81	VARAA	0,98	0,00	0	0,00	0	0	0,00	0	100 %	200,00	- €	- €	- €

Kuva 2. Kuvakaappaus Excel-pohjaisesta simulointityökalusta.

Simulointityökalun tarkoitus oli mahdollistaa sähkövaraston toiminnan tarkastelu vaihtuvilla parametreillä yhden vuoden jokaisena tuntina. Vaihtuvia parametrejä olivat akkujen kapasiteetti- ja tehoarvot sekä akun varaus- ja purkaussyklejä ohjaavat arvot. Parametrejä muuttamalla haettiin sopivaa akun kapasiteettiä sekä optimaalista tapaa ladata ja purkaa akku.

Lähtötietoina simulaatiotyökalun laatimiselle oli taloyhtiöiden kulutuslukemat vuoden ajalta, sähkön hintatiedot vuodelta 2023 ja PV-SOL-ohjelmistolla simuloitu aurinkosähköjärjestelmän tuotantolukemat jokaiselta vuoden tunnilta. PV-SOL-ohjelmisto on kehitetty pääasiassa aurinkopaneelijärjestelmien mitoittamiseen. Ohjelmistolla voidaan tehdä arvioita omakulutuksesta ja omavaraisuusasteesta. Ohjelma hyödyntää suoraan eri aurinkopaneeli-, invertteri- ja sähkövarastovalmistajien ajantasaisia tietokantoja.

Simulointityökalussa sähkön hintatiedot toimivat ohjaavana tekijänä akun varaus- ja purkaussykleille. Ensisijaisesti akkuun ohjattiin ladattavaksi aurinkosähkön ylituotantoa ja toissijaisesti sähköä verkosta. Mallinnusta tehdessä järkevimmäksi tavaksi osoittautui ohjata akun lataus-purkaussykli kahden seuraavan tunnin sähkön hinnan perusteella. Mikäli seuraavan kahden tunnin sähkön hinnan keskiarvo ylittää hetken sähkön hinnan on järkevää varata sähkövirtaa akkuun, jos keskiarvo alittaa hetken sähkön hinnan ohjaa simulaatiotyökalu purkamaan akkua.

Tuloksena simulaatiosta saatiin vuoden ajalta akkuun verkosta tai aurinkovoimalasta ladatun sähköenergian määrä, kuten myös käyttöön akusta puretun sähkön määrä. Simulointityökalu laski myös akuston lataus-purkaussyklien määrän, syklisen eliniän ja akuston avulla saavutettavan taloudellisen hyödyn.

Simulaatioon valittiin viisi eri kokoista akkua (Taulukko 3). Li-ion akkuja ei ole suotavaa ladata tyhjäksi, eikä myöskään aivan täyteen. Siksi mallinnuksessa otettiin huomioon 10 % akuston kokonaiskapasiteetista, jota ei käytetä, jolloin akun varaus vaihtelee välillä 5–95 %. Akuston kokoluokan mitoittamiseen vaikuttaa kohteen sähkökulutuksen määrä, kulutusprofiili ja akuston käyttötarkoitus. Rajoittavia tekijöitä on myös energiayhteisön osakkaiden investointihalukkuus ja joissain määrin akuston fyysinen koko ja käytettävissä olevat tilat akuston sijoittamista varten.

Kokonaiskapasiteetti, kWh	Käyttökapasiteetti, kWh	Lataus-purkaus-teho, kW	Investointikustannus, €
82,5	75	37,5	41250 €
110	100	50	55000 €
137,5	125	62,5	68750 €
165	150	75	82500 €
220	200	100	110000 €

Taulukko 3. Simulaatioon valitut akustot ja niiden ominaisuudet ja investointikustannukset.

Investoinnin kannattavuutta arvioitiin Excel -taulukkolaskentaohjelmalla käyttäen luvussa 7.1 esitettyjä kannattavuuslaskennan menetelmiä ja kaavoja.

Kannattavuuslaskennan tulokset saatiin numeerisessa muodossa ja arvioidaan sanallisesti johtopäätökset osiossa.

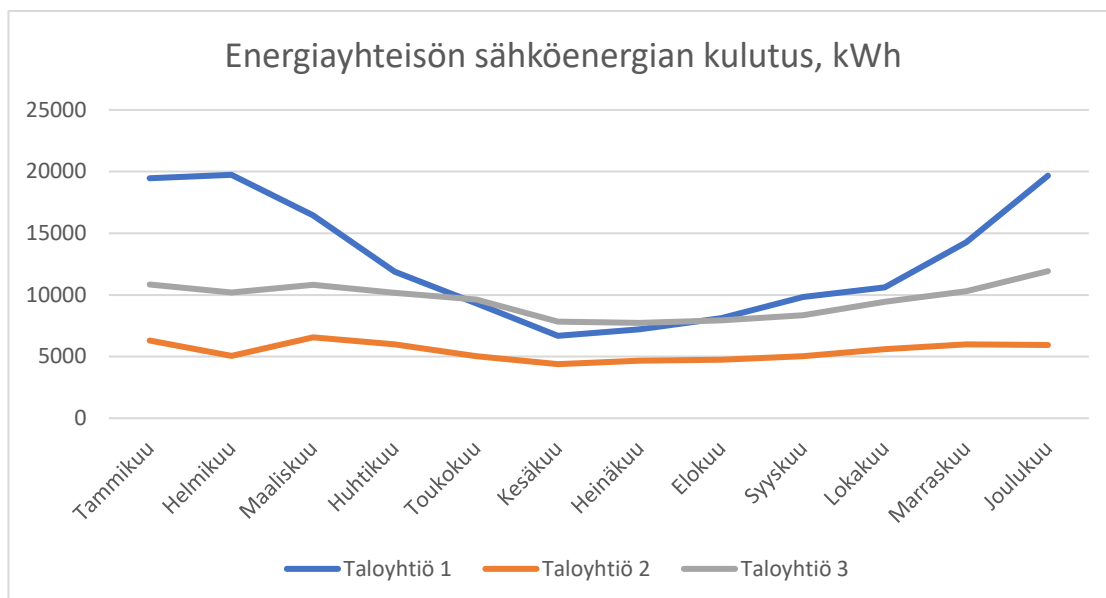
Akkujen hintataso vaihtelee mm. akkukemioiden mukaan (Kuvio 5). Kustannuksia tulee myös asennuksesta, johdotuksesta ja inverttereistä. Tässä opinnäytetyössä akuston investointikustannukseksi oletettiin 500 € / kWh kuviossa 5 esitettyjen akustojen hintatason perusteella.

8.2 Energiayhteisön kiinteistöt ja aurinkovoimala

Opinnäytetyössä tarkastellaan kolmen asunto-osakeyhtiön muodostamaa virtuaalista energiayhteisöä. Kaukolämmitykseen liitetyt taloyhtiöt sijaitsevat eri puolilla Joensuun kaupunkia. Taloyhtiöiden yhteenlaskettu vuoden sähkönkulutus on ollut 333653 kWh. Taulukossa 4 on kuvattu taloyhtiöiden sähkönkulutusta kuukausitasolla. Taloyhtiöiden 1 ja 2 sähkön kulutus on ollut melko tasaista vuodenajasta riippumatta. Taloyhtiön 3 sähkönkulutus on ollut talvikuukausina korkeampaa (Kuvio 7).

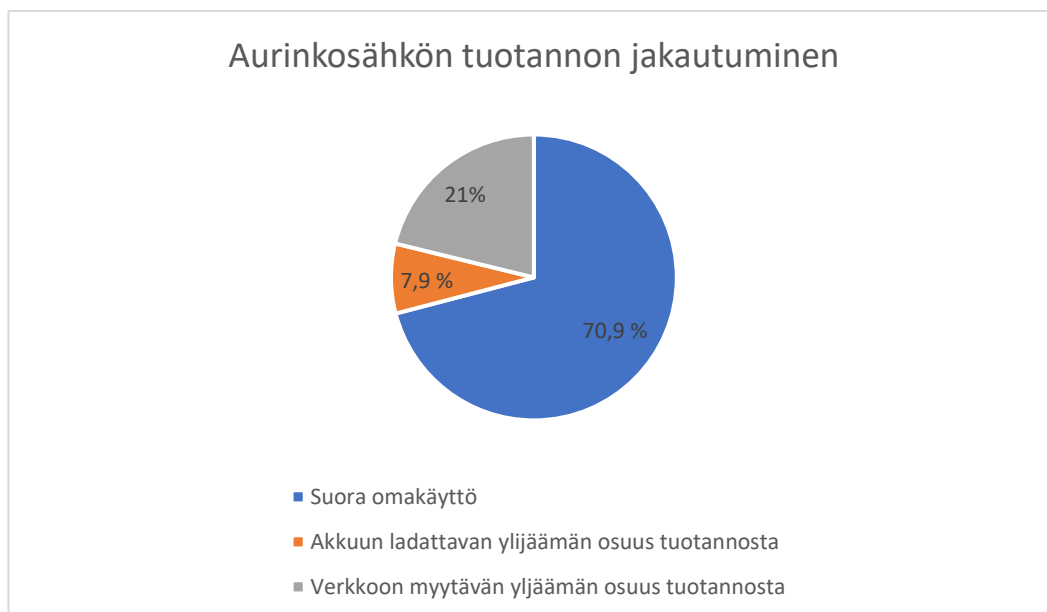
	Taloyhtiö 1, kWh	Taloyhtiö 2, kWh	Taloyhtiö 3, kWh	Yhteensä, kWh
Tammikuu	19471	6296	10836	36603
Helmikuu	19737	5052	10185	34974
Maaliskuu	16448	6560	10818	33826
Huhtikuu	11871	5979	10166	28016
Toukokuu	9322	5037	9622	23981
Kesäkuu	6682	4387	7830	18899
Heinäkuu	7210	4660	7731	19601
Elokuu	8121	4756	7928	20805
Syyskuu	9837	5029	8359	23225
Lokakuu	10606	5590	9442	25638
Marraskuu	14278	5980	10304	30561
Joulukuu	19669	5931	11925	37525
Yhteensä	153253	65254	115146	333653

Taulukko 4. Energiayhteisöön kuuluvien taloyhtiöiden sähköenergian kulutus vuoden aikana.



Kuvio 7. Energiayhteisöön osallistuvien taloyhtiöiden sähköenergian kulutus

Kohteeseen mitoitettiin PV-SOL ohjelmistolla 100 kWp:n tehoinen aurinkosähköjärjestelmä, jotta simuloinnissa voidaan ottaa huomioon myös aurinkosähkön omakäyttöasteen nostaminen sähkövarastoa hyödyntäen. Järjestelmä pyrittiin mitoittamaan niin, että kaikki tuotettu sähköenergia ei menisi suoraan kiinteistöjen käyttöön, jotta ylituotannon varastointi olisi mahdollista ottaa huomioon simulaatiossa. Aurinkosähköjärjestelmän koon kasvattamista rajoittaa osaltaan käytettävissä oleva kattopinta-ala. Järjestelmän vuosituotanto on 102014 kWh. Tuotannosta energiayhteisön kiinteistöjen suoraan käyttöön menee 72359 kWh, 200 kWh akustolla varastoidaan 8050 kWh ja verkkoon myydään 21605 kWh (Kuvio 8).



Kuvio 8. Aurinkosähkön tuotannon jakautuminen 200 kWh akustolla.

8.3 Reservimarkkinoiden tulojen arviointi

Energiayhteisön osallistuessa reservimarkkinoille aggregoinnin kautta, tarkka tulovirtojen mallintaminen on haastavaa. Työssä arvioitiin kolmea sähkövarastoille soveltuvaa reservimarkkinatuotetta. Reservimarkkinoilta saatavat tulot riippuvat mm. reservituotteiden kysynnästä ja hintakehityksestä sekä aggregoijan osuudesta tuloista. Tulovirtoja voidaan kuitenkin arvioida Fingridin laskentakaavalla:

$$\text{Vuosituotto (€)} = \text{hyväksytyt reservikapasiteetti (MW)} * \text{ka_hinta} \left(\frac{\text{€}}{\text{MWh}} \right) * \text{pysyvyys (h)}$$

Opinnäytetyössä käytettiin hyväksyttynä reservikapasiteettinä akuston purkaustehoa, eli tehoa, jolla akusto kykenee vakauttamaan sähköverkon taajuutta. FFR markkinoilla pysyvyys on arvioitu vuonna 2023 reservin aktivoituneiden tuntien lukumäärän perusteella. FCR-D ja FCR-N markkinoilla pysyvyys on arvioitu energiavirtojen simuloinnin perusteella pohjautuen vuoden tunteihin, jolloin akussa on varausta. Simulaation perusteella akussa on varausta 4800 tuntina vuodessa. Reservituotteiden vuoden keskihinnat ovat vuodelta 2023 (Liitteet 1–2). Alla on esitetty esimerkkilaskelmia Fingridin laskentakaavan käytöstä eri reservituotteiden tulojen arvioinnissa.

Arvio nopean taajuusreservin (FFR) ylläpidosta saatavasta kapasiteettikorvauksesta 75 kWh/37,5 kW akustolla:

$$0,0375 \text{ MW} * 38,00 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 1032 \text{ h} = 1470,6 \text{ €} \approx 1470 \text{ €}$$

Arvio taajuusohjatun häiriöreservin (FCR-D) ylläpidosta saatavasta kapasiteettikorvauksesta 75 kWh/37,5 kW akustolla:

$$0,0375 \text{ MW} * 2,81 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 4800 \text{ h} = 505,8 \text{ €} \approx 500 \text{ €}$$

Arvio taajuusohjatun käyttöreservi (FCR-N) ylläpidosta saatavasta kapasiteettikorvauksesta 75 kWh/37,5 kW akustolla:

$$0,0375 \text{ MW} * 19,10 \frac{\text{€}}{\text{MWh}} * 4800 \text{ h} = 3438 \text{ €} \approx 3400 \text{ €}$$

9 Tulokset

Tässä osiossa esitellään simulaation tulokset sekä arviot reservimarkkinoilta saatavista tuloista. Simulaation tulokset esitetään energiamäärinä taulukossa 5. Reservimarkkinatuotteista arvioitiin FFR, FCR-D ja FCR-N osallistumisesta saatavia tuloja. Lopuksi luvussa 8.3 on havainnollistettu taulukkomuotoon taloudellinen yhteenveto, jossa huomioidaan aurinkosähkön omakäyttöasteen nousu, arbitraasikäyttö ja reservimarkkinat.

9.1 Arbitraasikäyttö

Taulukossa 5 on esitetty simulaation tuloksia aurinkosähkön ylituotannon varastoinnista ja arbitraasikäytön energiamääristä eri kokoisilla akustoilla. Laskelmissa on huomioitu 5 %:n lataushäviö, jolloin akun hyötysuhde olisi 95 %.

Akuston käyttökapasiteetti, kWh	75	100	125	150	200
Akkuun verkosta ladattu energia, kWh	58 089	78 762	99 876	121 274	164 350
Akkuun ladattu aurinkosähkön yli- tuotanto, kWh	6 561	7 438	7 874	8 026	8 050
Lataushäviöt*, kWh	3 233	4 310	5 388	6 465	8 620
Energia verkosta ja aurinkosähkön ylijäämästä*, kWh	67 883	90 510	113 138	135 765	181 020
Akusta käyttöön purettu energia, kWh	64 650	86 200	107 750	129 300	172 400
*Hyötysuhde huomioiden. Hyötysuhteeksi oletettu 95 %.					

Taulukko 5. Simulaation tulokset.

9.2 Reservimarkkinoiden tulovirrat

Taulukossa 6 esitetyt arviot reservimarkkinoilta saatavista vuosiansioista on karkea arvio. Tapauskohtainen todellinen ansio riippuu reservimarkkinoiden tuotteiden kysynnästä ja hintakehityksestä sekä mahdollisen aggregoijan osuudesta ansioista. FCR-D ja FFR markkinoille vaaditaan vähintään 1 MW:n tehoinen sähkövarasto, jolloin näille markkinoille osallistuminen onnistuisi ainoastaan aggregoinnin kautta. FCR-N markkinoille osallistumiseen vaaditaan 0,1 MW:n tehoa, jolloin suurimmalla akulla reservimarkkinoille osallistuminen onnistuisi myös ilman aggregointia. Myös akuston arbitraasi-käyttöä tulee huomioida ja yhteensovittaa osallistuessa reservimarkkinoille.

Laskelmissa ei ole otettu huomioon energiamaksuja. FCR-N markkinoilla tulee ottaa huomioon myös kapasiteettikorvauksen lisäksi maksettava energiamaksu, joka perustuu toimitetun energian määrään. FCR-D ja FFR-markkinoilla maksetaan ainoastaan kapasiteettikorvausta.

Akusto		FFR	FCR-D	FCR-N
Kapasiteetti, kWh	Purkaus-teho, kW	Nopea taajuusreservi	Taajuusohjattu häiriöreservi	Taajuusohjattu käyttöreservi
75	37,5	1471 €	506 €	3438 €
100	50	1961 €	674 €	4584 €
125	62,5	2451 €	843 €	5730 €
150	75	2941 €	1012 €	6876 €
200	100	3922 €	1349 €	9168 €

Taulukko 6. Eri akustoiden arvioitu vuosiansio reservin ylläpidosta eri reservituotteilla laskettuna Fingridin laskentamallilla.

9.3 Taloudellinen tarkastelu

Taulukossa 7 on koottu taloudellisten laskelmien tulokset yhteen. Taulukosta voidaan nähdä, että nykyarvomenetelmällä laskiessa tuottojen nykyarvo ylittää investoinnin nykyarvon vain FCR-N reservimarkkinoille toimittaessa. Tällöin investoinnin voi odottaa olevan kannattava kaikilla tarkastelluilla akuilla.

Akuston käyttökapasiteetti (kWh), teho (kW)		75 / 37,5	100 / 50	125 / 62,5	150 / 75	200 / 100
Lataus-purkaussykli, kpl/a		863	863	863	863	863
Syklinen elinikä*, a		9,3	9,3	9,3	9,3	9,3
Investointi, €		41 250	55 000	68 750	82 500	110000
Tuotto aurinkosähkön varastoinnista, €/a		383	432	455	461	462
Tuotto arbitraarista, €/a		3000	3924	4819	5697	7445
Tuotto reservimarkkinoilta, €/a	FFR	1471	1961	2451	2941	3922
	FCR-D	506	674	843	1012	1349
	FCR-N	3438	4584	5730	6876	9168
Eliniän tulojen nettonykyarvo**	FFR	33 019	42 973	52 543	61 897	80 454
	FCR-D	26 459	34 219	41 606	47 625	62 955
	FCR-N	46 401	60 814	74 846	100 549	116 139
Koroton takaisinmaksuaika, vuotta	FFR	8,5	8,7	8,9	9,1	9,3
	FCR-D	10,6	10,9	11,2	11,5	11,9
	FCR-N	6,0	6,2	6,2	6,3	6,4
*Akuston sykliseksi kestoksi oletettu 8000 sykliä						
**Laskentakorko 6 %, jäännösarvoksi oletettiin 0 €, taloudellinen pitoaika 9 vuotta.						

Taulukko 7. Energiavirtojen mallinnuksen ja kannattavuuslaskennan tuloksien yhteenveto.

10 Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää keinoja maksimoida sähkövarastosta saatava hyöty energiayhteisössä ja arvioida investoinnin taloudellista kannattavuutta. Saaduilla tuloksilla on pystytty vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin, mutta tuloksia on syytä arvioida kriittisesti. Työn pohdinta -osiossa on arvioitu tutkimuksen epävarmuustekijöitä tarkemmin.

Tuloksista voidaan päätellä, että sähkövarasto yksin aurinkosähkön varastona ei ole taloudellisesti kannattava. Simuloinnissa mitoitettun aurinkosähkölaitteiston tuottamasta sähköstä vain 6,4 % 75 kWh akustolla ja 7,9 % 200 kWh akustolla ladattiin akkuun. Akuston syklinen käyttö jää vieläkin vähemmälle etenkin talviaikaan, jolloin tuotanto on vähäistä. Akuston elinkaari pitenee syklisen käytön vähentyessä, mutta kalenteri-ikäntymisen takia akusto ehtisi poistua käytöstä ennen kuin sähkövaraston käyttö kääntyisi voitolliseksi. Myöskään akuston kapasiteetin kasvattaminen ei juurikaan nosta aurinkosähkön omakäyttöastetta, jolloin voisi päätellä, että jos tarkoituksena on ainoastaan nostaa aurinkosähkön omakäyttöastetta, riittäisi energiayhteisölle pienempikin akku.

Energian arbitraasista ja toimimisesta reservimarkkinoilla saatavat tulot vaikuttavat tekevän sähkövarastoon investoinnista mahdollisesti kannattavaa. Nettonykyarvomenetelmällä arvioituna FCR-N markkinoille osallistuttaessa nettonykyarvo ylittää investoinnin arvon kaikilla akuilla, jolloin investointi olisi tuottoisa. Korottoman takaisinmaksuajan menetelmällä arvioituna FFR ja FCR-N markkinoilla toimiessa investointi on kannattava kaikilla akuilla. Nopeinten itsensä takaisinmaksava yhdistelmä olisi 75 kWh:n akusto ja osallistuminen FCR-N markkinoille. FCR-N reservimarkkinoille osallistuminen on vaihtoehtoista vähiten kannattava.

Arbitraasista saatavat tulot ovat suhteellisen suuria, mutta myös kuluttavat akkua toistuvilla lataus-purkaussykleillä. Arbitraasista saatavat tulot myös nousivat akuston kokoa kasvattaessa. Laskelmia ei voi kuitenkaan pitää kuin suuntaa antavana luvussa 11 esitettyjen epävarmuustekijöiden takia. Kokonaisuudessaan työn tulokset antavat viitteitä, että sähkövarasto voi olla taloudellisesti kannattava, mikäli sitä käytetään useissa sovelluksissa yhtäaikaaisesti.

11 Pohdinta

Useassa käytössä toimivan sähkövaraston taloudellisen kannattavuuden selvittäminen on parhaimmillaankin vain arvio. Eräs epävarmuutta aiheuttava seikka on sähkön hinnan kehittyminen tulevaisuudessa. Energia-arbitraasista saatavat tulot perustuvat sähkönhinnan heilahteluun ja sen hyödyntämiseen. Mikäli

sähkön hinta nousee tulevaisuudessa, nousee etenkin aurinkosähkön ylituotannon varastoinnin merkitys. Halpa ja vakaa sähkön hintataso olisi sähkövaraston taloudellisen kannattavuuden kannalta huonoin vaihtoehto. Säättökykyisen sähköntuotannon väheneminen tulvaisuudessa lisää tarvetta eri reservituotteille, jotta sähköverkko pysyy luotettavana. Tällöin voisi olettaa myös reservituotteiden kysynnän ja hintatason pysyvän korkealla tasolla.

Laukkasen (2023, 63–64) diplomityössä mallinnettiin teollisen kokoluokan akustoilla energia-arbitraasia sekä reservimarkkinoilta saatavia tuloja erikseen, mutta ei yhtäaikaisesti. Mallinnuksessa käytettiin ohjaavana tekijänä yhtä tai kahta lataus-purkaussykliä. Mallinnus siis eroaa tämän opinnäytetyön toteutuksesta, mutta antaa viitteitä akkuvaraston taloudellisesta kannattavuudesta yleisesti. Tutkielmassa todettiin, että pelkässä arbitraasikäytössä akusto ei ole kannattava, mutta useilla reservituotteilla nettonykyarvoarvo kääntyi positiiviseksi. Työssä todettiin, että allokoimalla akustoa eri käyttötarkoituksiin tai markkinoille sen perusteella, mikä toiminta on kulloinkin kannattavinta, saavutettaisiin suurempi hyöty. Laukkasen diplomityössä arvioitiin, että kokonaisuutena akustoinvestointi on mahdollista saada kannattavaksi, joskin siihen liittyy paljon epävarmuuksia. Tulokset ovat siis samansuuntaisia tämän opinnäytetyön kanssa, mikäli vertaa vain arbitraasikäytön tai reservimarkkinoiden tuloja yksittäin investointikustannuksiin.

Energiayhteisön olisi mahdollista saavuttaa säästöä myös huipputehon rajoittamisella. Mikäli sähkövarastoa käytettäisiin tehohuippujen leikkaamiseen (*peak shaving*), voitaisiin mahdollisesti säästää tehoerustaisissa sähkölaskuissa. Tulevaisuudessa voi olettaa sähköautojen määrän lisääntyvän, jolloin myös taloyhtiöiden on harkittava sähköautojen latauspisteiden hankintaa kiinteistöihin. Sähköautojen latauspisteet voivat aiheuttaa suurta sähkötehon tarvetta, jolloin sähkövarastolla voitaisiin välttää sähköliittymän koon suurentamista.

Mikäli akkutekniikka halventuu tulevaisuudessa reilusti, se voisi muuttaa sähkömarkkinoita dramaattisesti. Tuolloin olisi odotettavissa, että sähkövarastoja asennettaisiin useisiin sähkön käyttökohteisiin ja etenkin aurinkoenergian tuotannosta tulisi hyvin houkuttelevaa. Suuremmilla sähkövarastoilla sähkönkäyttäjät voisivat hyödyntää aurinkoenergiaa ympäri vuorokauden tai vaihtoehtoisesti käyttää edullisempia pörssisähkön tunteja sähkövaraston lataamiseen. Myös

sähköautojen lisääntyminen luo houkuttimen sähkön varastoinnista kiinnostuneille. Sähköautoja voitaisiin hyödyntää sähkövarastona erillisen sähkövaraston tapaan. Tämä vaatisi sähköautolta V2G (*vehicle-to-grid*) tekniikan, joka mahdollistaa kaksisuuntaisen latauksen.

Sähkövarasto ei kykene saarekekäytössä turvaamaan kiinteistöjen normaalia sähkönkulutusta pidemmäksi aikaa, mutta sähkövarastoa voitaisiin käyttää sähkökatkotilanteessa turvaamaan energiayhteisön kiinteistöjen kriittiset toiminnot, kuten ilmanvaihto ja valaistus. Saarekekäytön mahdollisuus lisäisi akuston käyttöarvoa ja kiinteistöjen huoltovarmuutta. Kuitenkin sähkökatkot ovat taajama-alueella hyvin harvinaisia, eivätkä myöskään yleensä ennustettavissa. Sähkökatkon äkillisyyden takia akun varaus voi katkon sattuessa olla matala, jolloin sähköenergiaa ei välttämättä riittäisi turvaamaan kiinteistöjen kriittisiä toimintoja.

Sähkövaraston toiminnan simuloinnissa ei otettu huomioon akun ikääntymistä ja siitä johtuvaa kapasiteetin heikentymistä. Akun elinkaaren loppuun määritellään usein, kun kapasiteetista on jäljellä 70–80 % (Linja-Aho 2022, 55). Tällöin akun kapasiteetti heikentyisi 20–30 % elinkaarensa aikana, jolla olisi merkittävä vaikutus myös investoinnin kannattavuuteen.

Opinnäytetyön energiavirtojen simuloinnissa käytetty lataus-purkausjakson ohjaavana tekijänä toimi kahden seuraavan tunnin spot-hintojen keskiarvo. Todellisuudessa markkinoilla on saatavissa ohjelmistoja, jotka kykenevät monipuolisempaan ja taloudellisempaan lataus-purkausjaksojen ohjaamiseen. Tulevaisuudessa tekoälyä hyödyntäen on mahdollista optimoida lataus-purkausjaksoja entistä paremmin. Simuloinnissa eikä kannattavuuden arvioinnissa myöskään otettu huomioon akun ikääntymistä ja siitä johtuvaa kapasiteetin heikentymistä.

Kannattavuuden arvioinnissa ei huomioitu nykyistä virtuaalisia energiayhteisöjä koskevaa lainsäädäntöä ja verotuskäytäntöjä kokonaisuudessaan. Nykyisen lainsäädännön mukaan hajautetussa energiayhteisössä kiinteistöjen välisestä sähkönsiirrosta joudutaan maksamaan sähkövero sekä paikalliselle verkkoyhtiölle siirtomaksua. Näitä seikkoja ei ole otettu huomioon kannattavuuden arvioinnissa, joka vaikuttaa kannattavuuteen merkittävästi.

11.1 Jatkokehitysmahdollisuudet

Aihetta voi jatkokehittää ja soveltaa erilaisiin tapauksiin ja kohteisiin sopivaksi. Opinnäytetyötä varten luodun simulointityökalun pohjalta olisi mahdollista luoda edistyneempi simulointiohjelmisto, jossa voisi hyödyntää esimerkiksi tekoälyä lataamisen ja purkamisen ohjaamiseen. Edistyneemmällä simulointityökalulla energiayhteisön energiavirtojen käsittely olisi tarkempaa ja nopeampaa ja sähkövarastoa harkitsevat energiayhteisöt voisivat saada tarkempaa dataa taloudellisten edellytysten arviointiin. Sähkövarastoa energiayhteisössä voisi jatkotutkia myös elinkaariarvioinnin näkökulmasta.

Lähteet

- Brown, L.R. 2015. Suuri energiamurros. Helsinki: Into Kustannus.
- CleanTech Controls. 2024. Energy Arbitrage: Optimizing Energy Assets for Profit. <https://www.cleantechcontrols.com.au/energy-arbitrage-optimizing-energy-assets-for-profit/#:~:text=Energy%20arbitrage%20is%20the%20process,to%20capitalize%20on%20market%20inefficiencies>. 18.4.2024
- Elenia, VTT. 2024. Energiayhteisökäsikirja. <https://www.elenia.fi/files/446062335d32e9fe81280ffcde09886e46b2955f/elenia-energiayhteisokasikirja-2024.pdf>. 20.2.2024
- Energiavirasto. 2023. Aurinkosähkön pientuotanto kasvoi voimakkaasti vuonna 2022. <https://energiavirasto.fi/-/aurinkosahkon-pientuotanto-kasvoi-voimakkaasti-vuonna-2022>. 19.3.2023
- Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/2413.
- Fingrid Oyj. 2024a. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/#taajuusmittausdata>. 26.2.2024
- Fingrid Oyj. 2023a. Miksi sähköjärjestelmän vakaa taajuus on tärkeää? <https://www.fingridlehti.fi/miksi-sahkojarjestelman-vakaa-taajuuson-tarkeaa/>. 28.2.2024
- Fingrid Oyj. 2023b. Fingridin sähköjärjestelmävisio 2023. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/sahkomarkkinat/2023/fingrid_sahkojarjestelmavisio_2023.pdf. 19.3.2024
- Fingrid Oyj. 2024b. Markkinapaikat. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/#sahkomarkkinoiden-aikajana>. 18.4.2024
- Fingrid Oyj. 2023c. Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>. 18.4.2024
- Fingrid Oyj, Energiateollisuus. 2024. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. https://fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi_versio_sahkomarkk.pdf. 18.4.2024
- Fingrid Oyj. 2024c. Itsenäinen aggregointi. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/itsenainen-aggregointi/>. 21.4.2024
- Gabbar, H., Othman, A., Abdussami M. 2021. Review of Battery Management Systems (BMS) Development and Industrial Standards. <https://www.mdpi.com/2227-7080/9/2/28>
- Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P. 2007. Tutki ja kirjoita. 13. osin uudistettu painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy
- IRENA. 2017. Electricity storage and renewables: cost and markets to 2030. <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>. 22.2.2024
- Jyväskylän yliopisto. 2015. Tapaustutkimus. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/metelmapolkuja/metelmapolku/tutkimusstrategiat/tapaustutkimus>. 5.3.2024
- Karelia-ammattikorkeakoulu. 2024. Karelian opinnäytetyön ohje: Hyvä tieteellinen käytäntö. <https://libguides.karelia.fi/c.php?g=679019&p=4841504>. 5.3.2024
- Kommunikoiva energia -hanke. 2021. Aurinkosähkö- ja energiayhteistyö kysely taloyhteisölle. <https://kommunikoivaenergia.karelia.fi/wp-content/uploads/2021/11/Kyselyn-tulokset-kysymyksittain.pdf>.

- Laukkanen, J. 2022. Teollisen kokoluokan akuston hyödyntämisen kannattavuus sähkömarkkinoilla. Tampereen yliopisto. Tekniikan- ja luonnontieteiden tiedekunta. Diplomityö.
<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/151794/Laukkanen-Juuso.pdf?sequence=5>. 16.5.2024
- Linja-Aho, V. 2022. Litiumioniakkuteknikka. Tervakoski: Suomen Autoteknillinen Liitto ry.
- Motiva. 2024. Akut. https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkumisen/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut. 23.2.2024
- Pitkämäki, A., Kontiokari, Venla, Päälyssaho, M., Brockl, M., Raivio, T. 2017. Selvitys Li-akkujen turvallisuustekijöistä. Gai Consulting.
<https://urly.fi/3t8o>. 21.2.2024
- Sähkömarkkinalaki 588/2013.
- Tampereen yliopisto, Tampereen ammattikorkeakoulu & VTT. 2021. Prosumer Centric Energy Communities towards Energy Ecosystem (Pro-CemPlus) <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/135693/978-952-03-2238-0.pdf?sequence=5&isAllowed=y>. 19.3.2024
- Tutkimuseettinen neuvottelukunta. 2023. Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. https://tenk.fi/sites/default/files/2023-03/HTK-ohje_2023.pdf. 5.3.2024
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2018. Joustava ja asiakaskeinen sähköjärjestelmä. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161119/TEM_33_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 18.3.2024
- Työ- ja elinkeinoministeriö. 2023. Energiayhteisöt ja erilliset linjat. Energiayhteisöryhmän loppuraportti. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164884/TEM_2023_22.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 18.3.2024
- Valtioneuvoston asetus sähkötoimitusten selvityksestä ja mittauksesta 767/2021.

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N, FCR-D ylös ja FCR-D alas), vuosimarkkinahankinta ja toteutuneet tuntikaupat.

Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N, FCR-D ylös ja FCR-D alas), vuosimarkkinahankinta ja toteutuneet tuntikaupat - Fingrid

FINGRID

Vuosi	FCR-N hinta (€/MW,h)	FCR-N määrä (MW)	FCR-D ylös hinta (€/MW,h)	FCR-D ylös määrä (MW)	FCR-D alas hinta (€/MW,h)
2011	9,97	71,0	1,48	244,3	
2012	11,97	72,7	2,80	346,9	
2013	14,36	73,5	3,36	299,8	
2014	15,80	75,4	4,03	318,7	
2015	16,21	73,6	4,13	297,5	
2016	17,42	89,0	4,50	367,0	
2017	13,00	55,0	4,70	455,7	
2018	14,00	72,6	2,80	435,0	
2019	13,50	79,0	2,40	445,6	
2020	13,20	87,1	1,90	458,3	
2021	12,50	105,8	1,80	425,0	
2022	12,24	102,8	1,90	430,6	10,00
2023	19,10	67,7	2,81	345,1	9,99

Nopea taajuusreservi (FFR), vuosimarkkinahinta ja toteutuneet tuntikaupat.

Nopea taajuusreservi - Fingrid

FINGRID

Ajanjakso:

1.1.2023

-

31.12.2023

Hae

