

Sami-Alexi Korhonen

AKKUPOHJAISTEN ENERGIAVARAS- TOJEN INTEGRAATIO SÄHKÖAJONEU- VOJEN LATAUSRATKAISUIHIN

Diplomityö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastajat: Professori Pertti Järventausta
Väitöskirjatutkija Joni Markkula
Elokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Sami-Alexi Korhonen: Akkupohjaisten energiavarojen integraatio sähköajoneuvojen latausratkaisuihin.

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Sähkötekniikan DI-ohjelma

Elokuu 2023

Sähköajoneuvojen voimakas lisääntyminen vaatii latausinfrastruktuurin kehittämistä. Latausinfrastruktuurin kehittämistä voi kuitenkin rajoittaa sähköverkon kapasiteetin riittämättömyys. Toisaalta latauspalvelujen laadun pitää olla entistä parempaa, kun sähköajoneuvojen määrä kasvaa. Tämän työn tarkoituksena onkin siis esitellä mitä mahdollisuuksia näiden parantamiseen energiavarojen integroiminen latausjärjestelmään tuo ja mitä asioita tällaisen integraation toteuttamisessa on otettava huomioon.

Käytännön toteutusta varten tässä diplomityössä tehtiin kirjallisuuskatsaus eri energiavaroista, latausratkaisujen topologiasta, sekä erinäisistä standardeista ja ohjeistuksista mitä toteutuksessa on otettava huomioon. Lisäksi etsittiin eri hyödyt ja haitat sekä tehtiin kannattavuuslaskelmat saavutettavissa olevista tuotoista investoinnin reunaehdon löytämistä varten.

Energiavaroja on monenlaisia ja niiden ominaisuudet sekä koko vaihtelevat. Energiavarojen ja latausratkaisun integraatiossa pieni koko on edellytys, sillä käytettävissä oleva tila saattaa olla rajallinen. Tämän takia tärkeimmät ominaisuudet energiavaroille ovat ominaisenergian ja -tehon määrä sekä energia- ja tehotehoisuus. Lisäksi huomiota on hyvä kiinnittää elinikään ja turvallisuuteen. Nämä kriteerit täyttävät parhaiten akut, vauhtipyörät ja superkondensaattorit. Akkuja käsiteltiin tarkemmin, sillä eri akkuvaihtoehtoja on useita erilaisia ja niiden ominaisuudet vaihtelevat paljon. Edellä mainitut kriteerit täyttävät parhaiten NMC- ja LFP-akkukemialla varustetut litiumioniakut sekä NaS-akut.

Energiavarojen integraation tuomiin mahdollisuuksiin lukeutuu kuormahuippujen rajoittaminen, kuormien tasaaminen, varavoima, reservimarkkinoille osallistuminen sekä uusiutuvien energianlähteiden integroinnin helpottuminen. Esimerkiksi integraation ansiosta latausratkaisuja voidaan toteuttaa paikkoihin, joissa sähköverkon kapasiteetti ei riitä. Integraation haitat liittyvät turvallisuuteen, ympäristöön, investointikustannuksiin ja elinikään.

Kannattavuuslaskelmien mukaan nykyisillä akkujen hinnoilla ei päästä kannattavaan investointiin ja investointi muuttuu kannattavaksi vasta, kun akkujen hinta laskee arvoon 250 €/kWh. Integraation muilla hyödyillä pitäisi siis olla asiakkaalle tarpeeksi arvoa, jotta investointi olisi järkevä. Hyötyjen arvon arviointi vaatii kuitenkin tapauskohtaista tarkastelua.

Käytännön integraatiota varten selvitettiin eri ohjeistuksia ja standardeja, jotka on huomioitava toteutettaessa energiavarojen integraatiota. Teorian avulla toteutettiin Viinikan julkisen latausaseman energiavarojen ja latausjärjestelmän integraatio käytännössä. Käytännön projektin toteutuksella pyrittiin todistamaan teoriaosuuden paikkansapitävyys sekä hakemaan kehityskohteita tulevia projekteja varten.

Nykyisillä hinnoilla energiavarojen integraatiota latausratkaisuun on kuitenkin hyvin vaikea perustella pelkästään kannattavuuden kautta, joten investoinnin kannattavuuden lisäksi myös muiden hyötyjen arvo on huomioitava. Tulevaisuudessa on syytä tarkkailla muita akkuteknologioita sekä hintojen kehitystä, sillä hintojen laskun kautta investoinnit muuttuvat kannattaviksi. Lisäksi olisi järkevää tutkia reservimarkkinoiden vaikutus integraation kannattavuuteen, sillä niitä ei tämän työn yhteydessä tutkittu.

Avainsanat: akkuenergiavaro, akku, energiavaro, sähköajoneuvojen latausratkaisut.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Sami-Alexi Korhonen: Battery energy storage system integration with electric vehicle charging station.

Master's Thesis

Tampere University

Master's Programme in Electrical Engineering

August 2023

The increasing number of electric vehicles (EV) requires development of the charging infrastructure. Grid capacity can be a limiting factor in the development of the charging infrastructure. On the other hand, charging service quality needs to be improved with the increase of electric vehicles. The goal of this thesis is to show what improvements can be achieved with the integration of energy storage system with charging station and what needs to be considered when doing such integration.

For the practical part of this thesis a literary survey was conducted to receive information about different energy storages, charging station topologies along with what standards and guidelines need to be considered in the integration process. Additionally, the different pros and cons of the integration were surveyed along with cost calculations to find the boundary condition of the investment.

There are many different energy storage systems available, and their properties and size vary. Small size is a must in the integration of energy storage system and charging station as the available space may be restricted. Because of that, the most important properties of energy storage are the specific energy and power along with energy and power density. Other properties that should be kept in mind are the lifetime and safety. Batteries, flywheels, and super capacitors meet these criteria best. Further look was conducted into batteries as there are many types of batteries and their properties vary a lot. The best battery types fitting these criteria are NMC and LFP lithium-ion batteries and NaS batteries.

The integration of energy storage system brings benefits that include peak power reduction, load balancing, backup power, ability to participate in reserve markets and simplifying renewable energy source integration. For example, with the integration of energy storage system it is possible to implement charging stations where the grid capacity is not enough. The cons of the integration include safety, environmental issues, high investment costs and lifetime.

According to the cost calculations it is not profitable to integrate energy storage with a charging station with current prices. The investment becomes profitable once the price of batteries drops to a value of 250 €/kWh. The other benefits of the integration should have enough value for the customer to make the investment worthwhile. However, evaluating the value of the benefits requires a case-by-case review.

For the practical integration, different guidelines and standards were examined. This information was used when implementing the energy storage integration. The implementation of the practical project aimed to prove the validity of the theory section of this thesis and to search for development targets for future projects.

With the current prices, energy storage integration with charging stations is very hard to justify with just profitability, so the other benefits of the integration must be considered. In the future it is best to keep a look out on new and developing battery technologies and the price development of current batteries as the investment is made profitable with price decreases. The effect of participating in the reserve markets on profitability should be evaluated, as it was not conducted as a part of this thesis.

Keywords: battery energy storage, BESS, EV, EV charging solutions

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Aivan ensimmäiseksi haluan esittää kiitokseni Plugit Finland Oy:lle ja sekä työni ohjaajalle Juha Kukkuraiselle tämän diplomityön mahdollistamisesta. Työn teon aikaiset sparraukset Juhan kanssa olivat iso apu diplomityön kokonaisuuden koostamisessa. Kiitos kuuluu myös koko Plugitin R&D-tiimille, sillä apua sai aina kun sitä tarvitsi asiassa kuin asiassa.

Kiitos kuuluu myös Tampereen Yliopistolle ja työn ohjaajana toimineelle professori Pertti Järventaustalle. Opintojen saattaminen loppuun diplomityön valmistumisen myötä oli Tampereen Yliopiston laadukkaan opetuksen sekä Pertin työnohjauksen avulla luontevaa ja kivutonta.

Viimeisenä, muttei vähäisempänä haluan kiittää puolisoani Emmaa diplomityön tekemisen aikaisesta tuesta sekä kannustuksesta. Tukesi merkitystä ei voi pukea sanoiksi.

Tampereella, 26.8.2023

Sami-Alexi Korhonen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta ja tavoitteet	1
1.2 Työn tutkimusmenetelmät ja rakenne.....	2
1.3 Plugit Finland Oy yritysesittely	3
2. ENERGIAVARASTOT	5
2.1 Energiavarastojen tyypit ja toimintaperiaatteet	5
2.2 Eri energiavarastojen vertailu ja sopivuuden arviointi sähköautojen latausympäristöön	7
3. AKKUENERGIAVARASTOT	10
3.1 Akkujen ja akkuenergiavarastojen rakenne	10
3.2 Akkuteknologioiden jaottelu.....	13
3.2.1 Lyijyhappoakku – Pb-Acid.....	14
3.2.2 Natriumrikkiakku – NaS.....	15
3.2.3 Litiumioniakut – Li-ion	16
3.2.4 Nikkelikadmiumakku – Ni-Cd	18
3.2.5 Nikkelimetallihybridiakku – Ni-MH	19
3.2.6 Virtausakku - VRFB	20
3.2.7 Tulevat akkuteknologiat	21
3.3 Akustojen vertailu.....	22
4. SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSRATKAISUT.....	25
4.1 Lataustavat	26
4.2 Toimintaperiaate	27
4.3 Kommunikaatio	28
4.4 Latausratkaisujen yhdistäminen verkkoon.....	29
4.5 Latausratkaisujen ja energiavarastojen käytännön yhdistäminen	30
5. ENERGIAVARASTOJEN JA SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSRATKAISUJEN INTEGRAATION MAHDOLLISUUDET, HAITAT JA KANNATTAVUUS	33
5.1 Mahdollisuudet.....	33
5.1.1 Kuormahuippujen tehon rajoittaminen.....	34
5.1.2 Kuormien tasaaminen	36
5.1.3 Reservimarkkinoille osallistuminen	36
5.1.4 Jännitteen ja taajuuden säätö	37
5.1.5 Keskeytymätön virransyöttö	37
5.1.6 Uusiutuvien energianlähteiden integrointi.....	38
5.1.7 Varavoima.....	39
5.1.8 Yhteenveto.....	39
5.2 Haitat	40
5.3 Kannattavuus.....	42
5.3.1 Kiinteä hintaraja	45
5.3.2 Tehohuippujen rajaus ja kuormien tasaaminen	51

5.3.3 Hintaan pohjautuva energiavaraston lataus- ja purku.....	57
5.3.4 Yhteenveto eri laskelmista	60
6.ENERGIAVARASTON INTEGRAATIO SÄHKÖAJONEUVOJEN	
LATAUSRATKAISUUN.....	62
6.1 Akuston koon suunnittelu	62
6.2 Integraation tekemisessä huomioitavat asiat ja tarvittavat lähtötiedot.	64
6.3 Integraation toteutuksen vaiheet	65
6.3.1 Integraation toteutuksen suunnitteluprosessi	65
6.3.2 Energiavaraston suunnitteluprosessi.....	68
6.3.3 Integraation toteuttamisen yhteenveto	72
7.VIINIKAN JULKISEN LATAUSASEMAN VALMISTUS	73
7.1 Viinikan julkisen latausaseman suunnittelu ja rakentaminen	73
7.1.1 Akuston suunnittelu ja rakentaminen.....	73
7.1.2 Ohjelmiston suunnittelu ja toteuttaminen.....	76
7.1.3 Akuston ja latausjärjestelmän integraatio	78
7.2 Havainnot ja huomiot toteutuksesta	79
8.TULOKSIEN TARKASTELU	81
9.YHTEENVETO.....	85
LÄHTEET	88

LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETTY MATLAB OHJELMISTOKOODI

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Energiavarastojen luokittelu.</i>	5
Kuva 2.	<i>Akkuenergiavaraston kokonaiskuva.</i>	10
Kuva 3.	<i>Akkuenergiavaraston ohjausjärjestelmä, muokattu lähteistä [14] ja [15].</i>	11
Kuva 4.	<i>Akkukennojen tasapainottamisen periaatekuva.</i>	12
Kuva 5.	<i>Eri akkuteknologioiden ominaisenergiat [13].</i>	14
Kuva 6.	<i>Eri akkuteknologioiden ominaistehot [13].</i>	14
Kuva 7.	<i>Litiumakkuteknologioita ja niiden ominaisuuksia. Muokattu lähteestä [24].</i>	17
Kuva 8.	<i>Latausratkaisujen jaottelu. [28][30].</i>	25
Kuva 9.	<i>Mode 2- ja Mode 3 -lataustapojen toimintaperiaate.</i>	28
Kuva 10.	<i>Mode 4 -lataustavan toimintaperiaate.</i>	28
Kuva 11.	<i>Latausratkaisu yhteisellä DC-kiskolla.</i>	31
Kuva 12.	<i>Latausratkaisu yhteisellä AC-kiskolla.</i>	31
Kuva 13.	<i>Energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation luomat mahdollisuudet.</i>	34
Kuva 14.	<i>Yhteenveto saavutettavista hyödyistä eri mahdollisuuksilla.</i>	40
Kuva 15.	<i>Energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation negatiiviset tekijät.</i>	41
Kuva 16.	<i>Yhteenveto energiavarastojen ja latausratkaisujen haitoista.</i>	42
Kuva 17.	<i>Sähkön tuntikohtainen keskihinta eri vuodenaikoina. [55]</i>	43
Kuva 18.	<i>Ohjausalgoritmin logiikka, kun käytetään hintarajaa.</i>	47
Kuva 19.	<i>Akustoon varastoitu energiamäärä 48 h ajanjaksolla.</i>	48
Kuva 20.	<i>Kuorman lataustehon vaihtelu 48 h aikana.</i>	49
Kuva 21.	<i>Akuston lataus- ja purkutehot 48 h ajanjaksolla.</i>	50
Kuva 22.	<i>Verkosta otettu teho tarkasteltavan päivän aikana.</i>	50
Kuva 23.	<i>Pörssisähkön hinta vuoden ajanjaksolle. Muokattu lähteen [55] pohjalta.</i>	51
Kuva 24.	<i>Ohjausalgoritmin logiikka rajattaessa tehoa.</i>	53
Kuva 25.	<i>Energiavaraston lataus- ja purkutehot 48 h ajanjaksolla.</i>	54
Kuva 26.	<i>Energiavarastoon varastoitunut energiamäärä 48 h ajanjaksolla.</i>	55
Kuva 27.	<i>Verkosta otettu teho 48 h ajanjaksolla.</i>	56
Kuva 28.	<i>Hintaan pohjautuvan ohjausalgoritmin logiikka.</i>	58
Kuva 29.	<i>Energiavaraston purku- ja latausteho 48 h ajanjaksolla.</i>	59
Kuva 30.	<i>Energiavarastoon varastoitu energiamäärä 48 h ajanjaksolla.</i>	59
Kuva 31.	<i>Verkosta otettu teho 48 h ajanjaksolla.</i>	60
Kuva 32.	<i>Energiavaraston kapasiteetin suunnittelemisen periaatekuva.</i>	63
Kuva 33.	<i>Integraation suunnitteluprosessin yleinen kuvaus.</i>	67
Kuva 34.	<i>Energiavaraston suunnitteluprosessi.</i>	68
Kuva 35.	<i>Akkuhuoneen standardien mukainen merkintä. Muodostettu lähteen [72] avulla.</i>	70
Kuva 36.	<i>Energiavaraston suunnitteluprosessin yhteenveto ja huomioitavat asiat.</i>	71
Kuva 37.	<i>Integraation toteuttamisen yhteenveto.</i>	72
Kuva 38.	<i>Ohjelmiston suunnittelun ja toteuttamisen prosessi.</i>	78
Kuva 39.	<i>Työn vaiheet ja mitä tuloksia saatiin.</i>	84

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	<i>Työn tutkimuskysymykset ja luvut, joissa niihin vastataan.....</i>	<i>2</i>
Taulukko 2.	<i>Eri energiavarojen oleellisia tietoja. [4][5][6][7][8][9].....</i>	<i>9</i>
Taulukko 3.	<i>Lyijyakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].</i>	<i>15</i>
Taulukko 4.	<i>Natriumrikkiakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].</i>	<i>16</i>
Taulukko 5.	<i>Litiumioniakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].....</i>	<i>18</i>
Taulukko 6.	<i>Nikkelikadmiumakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].....</i>	<i>19</i>
Taulukko 7.	<i>Nikkelimetallihybridin ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].....</i>	<i>20</i>
Taulukko 8.	<i>Virtausakun (VRFB) ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].....</i>	<i>21</i>
Taulukko 9.	<i>Eri akkuteknologioiden ominaisarvot, muokattu lähteestä [13].</i>	<i>23</i>
Taulukko 10.	<i>Eri investointeja ja tarvittava säästö vuodessa 5 % korkokannalla.</i>	<i>46</i>
Taulukko 11.	<i>100 000 € investoinnilla saavutettava tuotto vuodessa.....</i>	<i>60</i>
Taulukko 12.	<i>50 000 € investoinnilla saavutettava tuotto vuodessa.....</i>	<i>61</i>
Taulukko 13.	<i>Työn yhteenvetotaulukko.</i>	<i>87</i>

MUUTTUJAT, LYHENTEET JA TERMIT

Muuttujat

E_{CAP}	Energiavaraston kapasiteetti, kWh
E_{ESS}	Energiavarastoon varastoitunut energia, kWh
p_{raja}	Sähkön hinnan raja-arvo, €/kWh
$p_{sähkö}$	Sähkön hinta, €/kWh
p_{min}	Sähkön hinnan minimiarvo seuraavan 24 h aikana, €/kWh
p_{max}	Sähkön hinnan maksimiarvo seuraavan 24 h aikana, €/kWh
P_{ESS}	Energiavaraston lataus- ja purkuteho, kW
P_{GRID}	Verkosta otettava teho, kW
$P_{GRID,MAX}$	Verkosta otettavan tehon sallittu maksimiarvo, kW
P_{LOAD}	Kuorman ottama teho, kW
r	Tehon rajoituksen määrä, %
t	Aika

Lyhenteet

BMS	engl. Battery Management System, akkuenergiavaraston akkuyksiköiden suojaus- sekä ohjausjärjestelmä.
BTM	engl. Behind-The-Meter, ilmaisee kohteen olevan loppukäyttäjän mittauspisteen takana.
CaaS	engl. Charging as a Service, latausratkaisun toteutus palveluna.
CAN	engl. Controller Area Network, kommunikaatioväylä erinäisten tietojen välittämiseen.
CP	engl. Control Pilot, ajoneuvon latauskaapelissa kulkeva johdin, joka välittää tietoa latausjärjestelmän tilasta.
DoD	engl. Depth of Discharge, energiavaraston purkusyvyys.
EvCC	engl. Electric vehicle Communication Controller, ajoneuvossa sijaitseva latausjärjestelmän ohjausyksikkö.
IC-CPD	engl. In-Cable Control and Protection Device,
FES	engl. Flywheel Energy Storage, juoksupyöriin perustuva energiavarasto.
LFMP	Litium-mangaani-rautafosfaatti, litiumioniakussa käytetty elektrodimateriaali.
LFP	Litium-rautafosfaatti, litiumioniakussa käytetty elektrodimateriaali.
Li-air	Litiumakku, joka hyödyntää ilmaa.
Li-ion	Litiumioni, akkutyypin.
LiPO	Litiumpolymeeri, akkutyypin, jossa elektrolyyttinä toimii kiinteä polymeeri.
LMO	Mangaanioksidi, litiumioniakussa käytetty elektrodimateriaali.
NaS	Natriumriikkiakku, akkutyypin.
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi, litiumioniakussa käytetty elektrodimateriaali.
Ni-Cd	Nikkelikadmium, akkutyypin.
Ni-MH	Nikkelimetallihybridi, akkutyypin.
NMC	Nikkeli-koboltti-mangaanioksidi, litiumioniakussa käytetty elektrodimateriaali.
OCCP	engl. Open Charge Point Protocol, avoin protokolla latausjärjestelmän taustajärjestelmän toteuttamiseksi.
OSCP	engl. Open Smart Charging Protocol, avoin protokolla älykkään latausjärjestelmän toteuttamiseksi.
Pb-Acid	Lyijyhappoakku, akkutyypin.

PCS	engl. Power Conversion System, akkuenergiavaraston tehoelektroniiikka ja sen ohjausjärjestelmä.
PE	engl. Protective Earth, suojamaajohdin.
PHS	engl. Pumped Hydro Storage, pumpattu vesivoima.
PLC	engl. Power Line Communication, sähköjohtojen välityksellä toteutettava kommunikaatio
PMS	engl. Power Management System, tehonhallintajärjestelmä.
P2H2P	engl. Power to Hydrogen to Power, vetyyn pohjautuva energian varastointi ja muutos takaisin energiaksi.
R&D	engl. Research and Development, tuotetutkimus ja -kehitys.
SCADA	engl. Supervisory Control And Data Acquisition, systeemin valvontaja ohjausjärjestelmä.
SeCC	engl. Supply equipment Communication Controller, latausratkaisussa sijaitseva latausjärjestelmän ohjausyksikkö.
SMES	engl. Superconducting magnetic energy storage, suprajohtavuuteen perustuva sähkömagneettinen energiavarasto.
SoC	engl. State of Charge, energiavaraston varaustila.
SoH	engl. State of Health, energiavaraston kuntoa mittaava parametri.
SSC	engl. Supervisory System Control, vaihtoehtoinen termi akkuenergiavaraston tehoelektroniiikan ohjausjärjestelmälle.
UPS	engl. Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön virransyöttö.
VRFB	engl. Vanadium-Redox-Flow-Battery, akkutyyppi.
V2G	engl. Vehicle-to-Grid, verkkoon syötetään tehoa sähköajoneuvon akustolta.
V2L	engl. Vehicle-to-Load, kuormaan syötetään tehoa sähköajoneuvon akustolta.
V2X	engl. Vehicle-to-X (anything), sähköajoneuvon akuston hyödyntäminen johonkin (X) sovellukseen.
Termit	
Fingrid Oyj	Yritys, joka vastaa Suomen sähkönsiirtoverkosta ja reservimarkkinoista.
Hube	Plugit Finland Oy:n kehittämä suurteholatausjärjestelmä.
Nord Pool	Osakeyhtiömuotoinen sähköpörssi, jonka omistavat Pohjoismaiden ja Baltian kantaverkkoyhtiöt.
MATLAB	Tehokas laskentaohjelma, jolla voidaan toteuttaa monimutkaisia laskutapauksia.

1. JOHDANTO

Tämä diplomityö on tehty toimeksiantona Plugit Finland Oy:lle. Työ tehdään selvitys- ja projektityönä, jossa halutaan selvittää energiavarastojen ja sähköajoneuvojen latausratkaisujen yhdistämiseen liittyviä mahdollisuuksia ja sitä miten tällainen yhdistäminen tulisi toteuttaa.

1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Tässä diplomityössä perehdytään sähköautojen latausratkaisujen kehittämiseen integroimalla energiavarasto latausratkaisun yhteyteen. Tarkoituksena on esitellä tällaisen järjestelmän toteutuksessa huomioitavat asiat sekä esitellä erilaisia vaihtoehtoja sopivaksi energiavarastoksi ja niiden ominaisuuksia. Työ toteutetaan sillä, sähköautokannan voimakas kasvu edellyttää latausinfrastruktuurin kasvattamista ja yksi latausinfrastruktuurin kasvua rajoittavia tekijöitä on sähköverkon kapasiteetti [1]. Verkon kapasiteettia voidaan parantaa käyttämällä energiavarastoa verkkoliittymän tukemisessa. Lisäksi on mahdollista saavuttaa korkeampaa hetkellistä lataustehoa ja parantaa latauspalvelun laatua, jos sähkön syöttö on epävarmaa. Samalla parannetaan asiakkaalle tarjottavan latauspalvelun laatua. Toisaalta energiavarastot latausratkaisujen yhteydessä voivat mahdollistaa osallistumisen sähkön säätö- ja reservimarkkinoille, sekä tuoda mukanaan muita ansaintamahdollisuuksia. [2]

Työn tekemiselle asetettiin kaksi tavoitetta toimeksiantajan toimesta. Ensimmäinen tavoite oli energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation toteuttamiseen liittyvien asioiden selvittäminen. Toinen tavoitteista oli integraation toteuttamisen kannattavuuden ja saavutettavien hyötyjen arviointi. Näiden tavoitteiden pohjalta mietittiin työn tutkimuskysymykset heti alkuvaiheissa yhdessä ohjaajien kanssa. Tutkimuskysymyksien ja työn tavoitteiden avulla saatiin työn rakenne ja eteneminen kasattua yhdeksi jatkuvaksi kokonaisuudeksi. Tämän kokonaisuuden rakenne on esitelty luvussa 1.2 tutkimusmenetelmien kanssa. Oheiseen taulukkoon 1 on koottu tutkimuskysymykset siinä järjestyksessä, kuin niihin vastataan tekstissä. Tutkimuskysymyksien avulla voidaan perustella työn tavoitteet, jotka ovat integraation toteuttaminen ja toteuttamisen kannattavuuden arvioiminen.

Taulukko 1. Työn tutkimuskysymykset ja luvut, joissa niihin vastataan.

Tutkimuskysymykset	Luku/Luvut
1. Millaisia energianvarastointivaihtoehtoja on tarjolla sähköautojen latausaseman yhteyteen?	2 ja 3
2. Mitä arvoa asiakkaalle/yritykselle energiavaraston toteuttamisella on?	5
3. Millainen energiavarasto on toiminnallisuuksien ja ominaisuuksien puolesta perusteltu sähköajoneuvojen latausaseman yhteyteen?	5 ja 8
4. Mitä reunaehtoja energiavaraston toteuttamiselle on latausaseman yhteydessä?	5
5. Millainen energiavaraston integraatio latausasemaan olisi?	6 ja 7

1.2 Työn tutkimusmenetelmät ja rakenne

Tutkimusmenetelminä tässä työssä on käytetty kirjallisuuskatsausta ja konstruktivistista tutkimusotetta. Konstruktivisen tutkimuksen pohjatiedot on esitetty työn teoriaosissa luvuissa 2, 3, 4 ja 5. Teoriaosion tiedot on kasattu kirjallisuuskatsauksena, ja lähteinä on pyritty käyttämään mahdollisimman paljon vertaisarvioituja lähteitä.

Työssä on tarkoituksena selvittää prosessia, jolla energiavarastoja voidaan integroida latausratkaisujen yhteyteen. Tätä varten työssä käsitellään aluksi luvussa 2 yleisellä tasolla erilaisia energiavarastoja ja niiden ominaisuuksia. Tarkoituksena on saada kuva mitä eri vaihtoehtoja on tarjolla energiavaraston valintaan ja selvittää, mitkä näistä ratkaisuista on sopivia ja mitkä ratkaisut jätetään huomioimatta vertailemalla näiden ominaisuuksia.

Luvussa 3 avataan akustojen teoriaa laajemmin ja käsitellään tarkemmin muun muassa erilaisia akkukemioita. Eri akkukemioilla on erilaiset ominaisuudet ja näillä ominaisuuksilla on iso rooli akuston toiminnassa, joten mahdollisen integraation kannalta on tärkeää tietää eri akkukemioiden vahvuudet, heikkoudet ja muut ominaisuudet. Näin tekemällä voidaan vertailla eri akkukemioita ja selvittää käyttötarkoitukseen parhaiten sopiva, joka on samalla tärkein tutkimuskysymys luvusta. Samalla tarkastellaan lisäksi akkujen rakennetta, ja akustoihin liittyviä järjestelmiä sekä niiden toimintaa. Esimerkiksi Battery Management System (BMS) on yksi tällainen järjestelmä.

Luku 4 keskittyy käymään läpi sähköautojen latausratkaisujen teoriaa. Sähköautojen latausratkaisujen teoria pitää tässä yhteydessä käsitellä, jotta ymmärretään erinäisten latausratkaisujen toimintaperiaate sekä rakenne. Latausratkaisujen toimintaperiaatteella on merkitystä siinä suhteessa, että tiedetään millaisia asioita pitää huomioida, jotta energiavarasto voidaan liittää latausratkaisuun. Tutkimuskysymyksiä aihealueesta on esi-

merkiksi laitteiden välinen kommunikaatio ja tehon syötön ratkaisut. Selvittämällä ja tutkimalla näitä tietoja, saadaan selville, miten ylipäättensä on mahdollista integroida latausratkaisuun ulkopuolinen energiavarasto.

Energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation tuomat hyödyt sekä mahdollisuudet ovat tutkimuskohteena luvussa 5. Luvussa 5 mietitään myös kustannuksia ja mahdollisia tuottoja. Samalla näistä tehdään muutamia esimerkkilaskelmat. Lisäksi pyritään selvittämään mahdollisia käyttökohteita ja millaisista ratkaisuista ja ominaisuuksista kyseinen käyttökohde voisi hyötyä. Näitä löydettyjä hyötyjä ja kustannuslaskelmia voidaan käyttää tehtäessä investointipäätöksiä tai kun tällaisia integraatioita pyritään myymään asiakkaille. Luvussa 6 avataan käytännön energiavaraston ja latausratkaisun integraatiossa huomioitavia asioita ja esitellään suunnitteluprosessi tällaisen ratkaisun tekemiseen.

Luvussa 7 käsitellään aikaisemmin esitellyn teorian pohjalta suunnitellun energiavaraston toteutusta projektina. Tässä diplomityössä käytännön projektiksi valikoitui Viinikan julkisen latausaseman toteutus. Projektin tekemisestä saadut hyödyt otetaan käyttöön muissa projekteissa, joita tulevaisuudessa toteutetaan.

Työn lopussa luvuissa 8 ja 9 käydään läpi tutkimuskysymyksiin saatuja vastauksia ja näistä vastauksista tehdään yhteenveto. Lisäksi pohditaan tuloksia ja työn onnistumista. Yhteenvedon pohjalta tehdään suositukset, todetaan mahdolliset rajoitukset sekä käydään läpi muut tutkimuksen aikana esille tulleet asiat, jotka on huomioitava työn tuloksia hyödyntäessä. Lisäksi ehdotetaan tarvittavia toimenpiteitä lähitulevaisuudelle ja pidemmälle aikavälille, jotta työn tiedot pystytään hyödyntämään mahdollisimman hyvin.

1.3 Plugit Finland Oy yritysesittely

Tämän diplomityön toimeksiantajana toimii Plugit Finland Oy, joka tarjoaa kokonaisvaltaisia sähköautojen latausratkaisuihin liittyviä palveluja. Yrityksen palveluihin kuuluu latausratkaisujen tarvekartoitus, myynti, toimitus sekä omien latauslaitteiden tuotekehitys. Yritys on perustettu vuonna 2012, joten se on omalla toimialallaan varsin kypsä toimija. Toimipisteitä yrityksellä on ympäri Suomen, sillä yrityksen tavoitteena on olla siellä missä on asiakkaita. Yrityksen päätoimipiste sijaitsee Pirkkalassa. Latausratkaisuja yritys on toimittanut ympäri Suomen sinne missä niitä tarvitaan, eli työpaikoille, taloyhtiöihin, liikekeskuksiin ja ammattiliikennöitsijöille. Plugit on ensimmäisenä ottanut käyttöön Charging as a Service -mallin (CaaS), jossa asiakkaan ei tarvitse tehdä isoa alkuinvestointia latausratkaisuun, vaan maksaa latausratkaisusta ja sen toteuttamisesta käytön perusteella. Plugitilla on yli 400 asiakkuutta ja näihin on sijoitettuna yli 10 000 etähallittavaa latauspistettä. Lataustapahtumia Plugitin latauspisteillä on yli 2 miljoonaa vuodessa. [3]

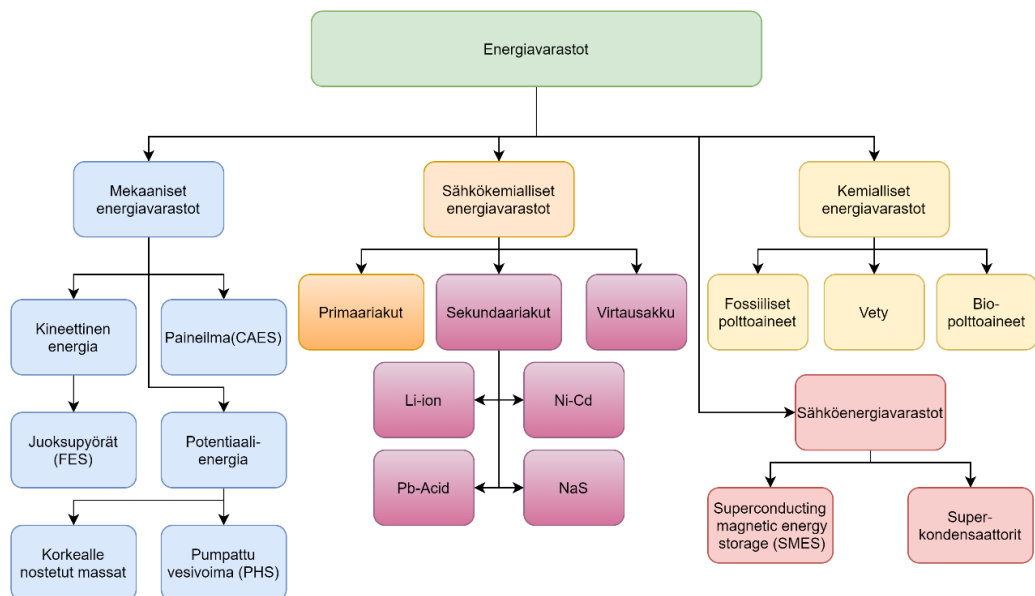
Tämä työ on tarkoitettu tukemaan yrityksen tuotekehitysyksikön eli Research and Development -yksikön (R&D) tavoitteita edistään samalla tietämystä aihealueesta yrityksen sisällä. Yrityksen visio on toimia latausratkaisujen edelläkävijänä ja toimittaa asiakkaille avaimet käteen -latausratkaisuja. Tällä työllä on siis tarkoitus edistää yrityksen edelläkävijän roolia latausratkaisujen parissa.

2. ENERGIAVARASTOT

Energiavarastoihin liittyvää tutkimusta on ajettu eteenpäin jo pitkään, sillä tarve energiavarastoille on kasvamassa. Erityisesti kemiallisiin ja sähkökemiallisiin ratkaisuihin perustuvien energiavarastojen kehitys on ollut nopeaa viimeisten vuosikymmenten aikana. [4] Energiavarastotyyppien ja näiden erojen takia on tärkeää, että ymmärretään eri energiavarastotyyppien vahvuudet ja rajoitukset. Lisäksi pitää pystyä arvioimaan mitä näistä eri energiavarastotyypeistä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää sähköautojen latausratkaisujen yhteydessä.

2.1 Energiavarastojen tyypit ja toimintaperiaatteet

Energiavarastot ovat jaettavissa eri tyypeihin perustuen niiden ominaisuuksiin ja rakenteeseen sekä perustuen siihen, missä muodossa energiaa varastoidaan energiavarastoon. Tätä luokittelua on havainnollistettu seuraavassa kuvassa 1. Energiavarastoja voidaan toisaalta luokitella myös niiden varastoiman energian vapauttamiseen kuluvan ajan perusteella tai niiden teknologisen kypsyyden perusteella. Energiavarastojen rakenne ja toimintaperiaate muuttuu, kun energiavaraston tyyppi muuttuu. Seuraavaksi käsitellään tarkemmin erilaisten energiavarastojen tyyppiä. [4][5][6][7][8][9]



Kuva 1. Energiavarastojen luokittelu.

Tunnetuin ja samalla suurin käytössä oleva energiavaraston tyyppi on pumpattu vesivoima, joka on potentiaalienergiaa hyödyntävä energiavarasto. Pumpattu vesivoima toimii periaatteella, jossa vettä aluksi pumpataan korkeammalle vesialtaaseen ja samalla

korkeampaan potentiaaliin. Kun energiaa halutaan käyttää, lasketaan vesialtaasta vettä esimerkiksi turpiinien kautta alempaan vesialtaaseen. Prosessissa vapautuu veteen sitoutunutta potentiaalienergiaa. [5] Pumpatun vesivoiman hyötysuhde on lähteen [5] mukaan noin 80 % ja verrattaessa lähteessä [6] ilmoitettuun 70–85 % hyötysuhteeseen, voidaan pitää 80 % hyötysuhdetta hyvänä arviona. Myös lähteessä [8] todetaan hyötysuhteen olevan noin 80 %. Pumpattu vesivoima on parhaimmillaan, kun käytössä on suuri vesiallas ja energiaa tarvitaan pidemmällä aikavälillä. [5][8] Pumpattu vesivoima ei vesialtaan koon takia sovellu pienikokoisiin ratkaisuihin.

Liike-energiaa varastoivat ratkaisut pohjautuvat energian varastointiin liikkuviin kappaleisiin. Tästä hyvä esimerkki on vauhtipyörä. Vauhtipyörät varastoivat energian pyörivän kappaleen pyörimisliikkeeseen, josta energiaa saadaan otettua käyttöön hidastamalla pyörintäliikettä. Kun energiaa halutaan varastoida vauhtipyörään, tapahtuu tämä lisäämällä vauhtipyörän pyörimisliikettä. [5][6] Hyötysuhde vauhtipyörälle on noin 90 % [9]. Vauhtipyörien käyttötarkoitus on toimia lähinnä nopeissa tehon tarpeissa. Vauhtipyörät eivät kuitenkaan sovellu pieniin ja liikuteltavissa oleviin energianvarastoihin lähteen [7] mukaan. [5][6][9]

Akustot perustuvat sähkökemiallisiin reaktioihin, joiden avulla voidaan varastoida ja vapauttaa energiaa akuston kemiallisista reaktioista. Akustojen vapauttama energia on suoraan sähköenergiaa, joten erillistä konversiota eli muunnosta energianmuodosta toiseen, ei tarvita. Tämä mahdollistaa akkupohjaisen energiavaraston käyttämisen suoraan sähköisen järjestelmän yhteydessä. Akustojen vahvuuksia on niiden skaalautuvuus ja useat erilaiset ratkaisut, jotka mahdollistavat eri ominaisuuksien priorisoinnin tarpeiden mukaisesti. Akkupohjaisten energiavarastojen huonona puolena voidaan pitää akkujen kalliita hintoja, jotka ovat kuitenkin tulleet viime aikoina alaspäin [10]. Akustot siis mahdollistavat monipuoliset ratkaisut, joissa voidaan huomioida purku- ja lataustehon tarve, sekä varastoitavan energianmäärän tarve. Akkuja käsitellään luvussa 3 tarkemmin, sillä eri variaatioita on monia ja näiden ominaisuudet voivat erota toisistaan huomattavasti. [4][10]

Vetyyn perustuvat energiavarastot toimivat periaatteella, jossa energiaa käytetään esimerkiksi veden elektrolyysissä vedyn tuottamiseen ja syntynyttä vetyä varastoidaan vedyn varastointiin suunniteltuihin säiliöihin. Vety voidaan säilöä joko nestemäisenä tai painestettuna kaasuna. On myös mahdollista varastoida vetyä kemiallisiin yhdisteisiin. [7] Vetyä voidaan hyödyntää sähkön ja lämmön yhteistuotantoon tai erikseen tuottamaan jompaa kumpaa, riippuen halutusta käyttötarkoituksesta. Prosessia, jossa energia muutetaan ensin vedyksi ja myöhemmin takaisin energiaksi, kutsutaan nimityksellä Power to Hydrogen to Power (P2H2P). Vedyn isoin heikkous on heikko hyötysuhde. Tämä johtuu

siitä, että ensiksi energian avulla tehdään vetyä noin 60 % hyötysuhteella [9]. Kun vety halutaan hyödyntää energiana, syötetään vety polttokennolle ja saadaan ulos sähköenergiaa noin 70 % hyötysuhteella [9]. Tästä seuraa, että koko prosessin alusta loppuun hyötysuhde on vain noin 40 %. Toisaalta vedyn ongelma on tarvittavan teknologian ja infrastruktuurin kypsyysaste, joka on vielä tällä hetkellä alhainen. Tämä johtaa samalla teknologian korkeisiin hintoihin ja tuotantokustannuksiin. Vedyllä on kuitenkin huomattavaa potentiaalia tulevaisuudessa, sillä sen avulla voidaan varastoida suuria määriä energiaa ja sitä voidaan käyttää monipuolisesti. Lisäksi vedyn valmistuksen raaka-ainetta eli vettä on runsaasti saatavilla, joten pulaa raaka-aineista ei synny. [5][9]

Sähköenergiavarastot ovat energiavarastoja, jotka varastoivat energiaa suoraan sähköenergiana. Näistä esimerkkejä ovat Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) ja superkondensaattorit. SMES-järjestelmät varastoivat sähköenergiaa suprajäähdytetyn kelan läpi virtaavan virran synnyttämään magneettikenttään, kun taas superkondensaattoreiden energianvarastointi perustuu kondensaattorin elektrodien väliseen sähkökenttään varastoituu energiaan. Nämä teknologiat on tarkoitettu lähinnä käyttötarkoituksiin, joissa tarvitaan isoja tehoja sekä nopeaa reaktioaikaa. SMES-teknologian turvallisuuden takaaminen vaatii useimmiten järjestelmän sijoittamisen maan alle [5], sillä jos järjestelmän jäähdytys pettää, kuumenee SMES-järjestelmä resistanssin kasvun takia. [5]

2.2 Eri energiavarastojen vertailu ja sopivuuden arviointi sähköautojen latausympäristöön

Sähköautojen latausratkaisujen sijoitusympäristö asettaa omat rajoituksensa sopiville energiavarastoratkaisuille. Toisaalta esteeksi energiavaraston valinnassa saattaa tulla kustannukset, sillä osa teknologioista on vielä kalliita toteuttaa, vaikka ne muuten olisivat sopivia ratkaisuja latausratkaisujen kanssa integroitavaksi. [12]

Sähköautojen latausratkaisujen sijoituspaikat, eli useimmiten taloyhtiöiden pysäköintialueet, liiketilojen pysäköintialueet ja kotipihat [3], eivät lähtökohtaisesti mahdollista isojen energiavarastojen rakentamista. Toisaalta latausratkaisujen pitää olla helposti skaalattavissa erilaisiin tarpeisiin niin kokonsa kuin tehon puolesta. [12]

Tärkeimmät valintakriteerit sopivan energiavaraston valinnassa ovat teho, energiamäärä, joka pitää pystyä varastoimaan sekä kustannukset. Muita huomioitavia asioita on energiavaraston fyysinen koko, eli onko sellainen mahdollista rakentaa latausinfrastruktuurin yhteyteen, käyttövarmuus sekä turvallisuus. Lähteessä [12] on todettu sähköautojen latausratkaisujen yhteyteen sopiviksi energiavarastoiksi vauhtipyörät, sähkökemialliset energiavarastot eli akustot ja superkondensaattorit. Samassa lähteessä on mainittu

akustojen käyttöön liittyvien rajoitusten liittyvän lähinnä akuston eliniän lyhenemistä, kun taas juoksupyörissä ei ole odotettavissa ainakaan samassa määrässä eliniän lyhenemistä. Juoksupyörien etu akustoihin verrattaessa on korkeampi tehon toimituskyky. [12] Superkondensaattoreista lähteessä mainitaan niiden korkeasta tehon toimituskyvystä verrattaessa akkuihin, mutta samalla mainitaan huonoksi puoleksi pieni energiatiheys. Nämä lähteen [12] päätelmät ovat samoja, joita löytyy myös lähteistä [4][5][6][9].

Vedyn heikko hyötysuhde ja muut teknologiaan ja sen kypsyyteen liittyvät ongelmat rajaavat vedyn tällä hetkellä pois valinnasta. Vedyn potentiaalia ei kuitenkaan voi unohtaa tulevaisuudessa. Samoin SMES-järjestelmät rajataan ulos niiden hyödyntämisen kalliin tekniikan, rajallisen energianmäärän ja järjestelmän sijoittamiseen liittyvien ongelmien takia. Pumpattu vesivoima rajataan ulos järjestelmän sijoituspaikan takia, sillä latausratkaisun yhteyteen ei ole mahdollista rakentaa isoa vesivarastoa ja muutenkin tällainen rakennelma olisi todella massiivinen latausratkaisuun verrattaessa. Juoksupyörien hyötysuhde, kestävyys ja kustannukset tekevät niistä varteenotettavan vaihtoehdon kuten lähteessä [12] mainitaan. Toisaalta, kuten lähteessä [7] on mainittuna, ne eivät sovellu pieniin ja liikuteltaviin ratkaisuihin, mikä voisi muodostua ongelmaksi latausratkaisujen yhteydessä.

Näiden yllä mainittujen ominaisuuksien pohjalta ja osittain myös aiheen rajauksen takia keskitytään tarkemmin akustoihin. Akkupohjaisia energiavarastoja on käytössä ympäri maailmaa ja niiden käytöstä on kokemuksia saatavilla, joka myös tukee akkupohjaisen ratkaisun valintaa [11]. Akustot tarjoavat monipuolisia vaihtoehtoja, joten ominaisuuksien ja teknisen kypsyytensä puolesta ne ovat hyvä vaihtoehto. Lisäksi akustot mahdollistavat helpon skaalattavuuden, josta on hyötyä latausratkaisujen sijoitusympäristön tapauksessa. Akustojen heikkoutena voidaan pitää kallista hintaa, joka on kuitenkin viimeisien vuosien aikana tullut vauhdilla alas, tehden akkupohjaisista ratkaisuista taloudellisesti houkuttelevampia muihin ratkaisuihin verratessa [10].

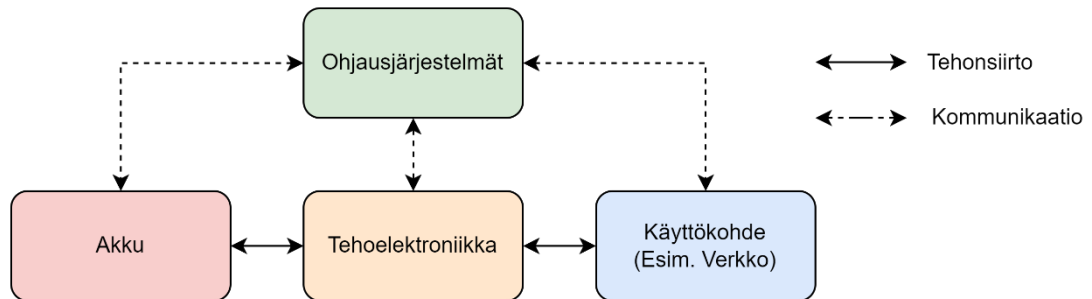
Seuraavaan taulukkoon 2 on koottu edellä käsitellyistä energiavarastoista tärkeimmät tiedot, kuten hyötysuhteet, toiminta-aika, reaktioaika ja laitteiston vaatima tila. Taulukossa on myös kohta, johon olen arvioinut edellä käytyjen tietojen pohjalta energiavaraston soveltuvuutta latausratkaisun yhteyteen.

Taulukko 2. Eri energiavarastojen oleellisia tietoja. [4][5][6][7][8][9]

	Hyötysuhde	Toiminta-aika	Reaktio-aika	Tilavaatimus	Soveltuvuus
Pumpattu vesivoima	80 %	h	s-min	Suuri	Huono
Vauhtipyörät	90 %	ms-min	ms-s	Skaalautuva	Hyvä
Akustot	85 %	min-h	ms-s	Skaalautuva	Hyvä
Vety	40 %	d	s-min	Keskisuuri	Huono
SMES	90 %	min-s	ms-s	Keskisuuri	Huono
Superkondensaattorit	80 %	ms-s	ms-s	Pieni	Ok

3. AKKUENERGIAVARASTOT

Sähkökemialliset energiavarastot eli niin sanotut akut, ovat yksi neljästä eri energiavarastotyypistä. Ne ovat nimensä mukaisesti tarkoitettu varastoimaan sähköenergiaa. Akkuja voidaan valmistaa usealla eri akkukemialla, jotka ovat siis erilaisia sähkökemiallisia ratkaisuja, ja jokaisella näistä on omat vahvuudet, heikkoudet sekä ominaisuudet. [4][5][6][10][13] Akkuenergiavarastojen eli akustojen kehitys on ollut huimaa edellisen vuosikymmenen aikana [4][13]. Kuva 2 esittää akkuenergiavaraston kokonaiskuvaa. Kuvassa käyttökohteella tarkoitetaan akustoa hyödyntävää kohdetta, joka voi siis olla esimerkiksi sähköverkko, latausasema tai vaikkapa sähköajoneuvon moottorit.



Kuva 2. Akkuenergiavaraston kokonaiskuva.

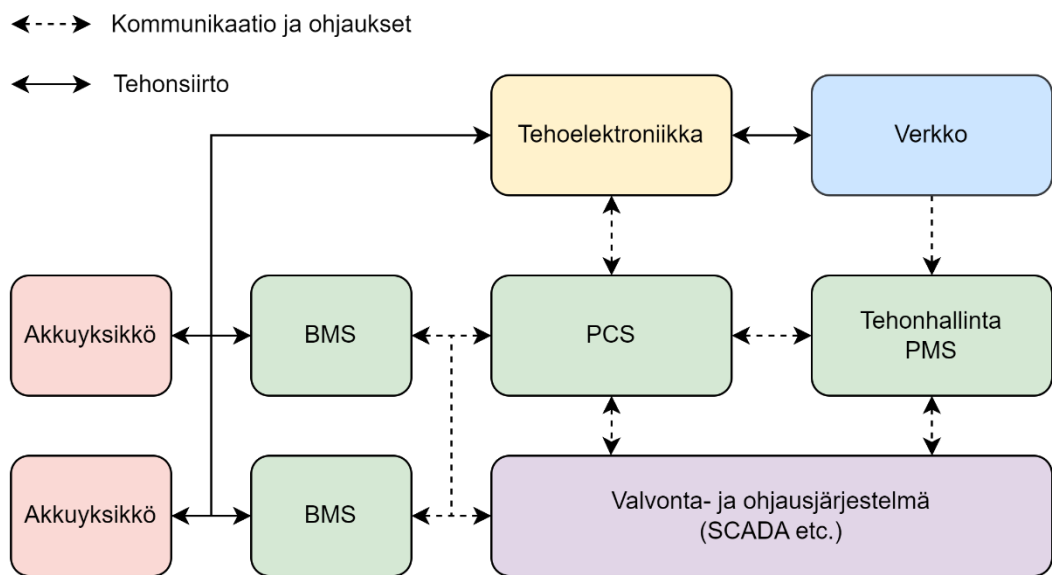
Seuraavaksi läpikäydään akkuenergiavaraston rakennetta, eri akkukemioita ja vertailaan millaisiin käyttötarkoituksiin eri akkukemiat soveltuvat parhaiten. Tämän luvun tarkoituksena on täydentää vastausta tutkimuskysymykseen: *Millaisia energiavarastointiratkaisuja on tarjolla integroitavaksi latausratkaisuun?*

3.1 Akkujen ja akkuenergiavarastojen rakenne

Akut koostuvat kennoista, joita valmistetaan eri akkuteknologioilla. Eri akkuteknologioissa käytetään erilaisia akkukemioita, jotka vaikuttavat akkujen ominaisuuksiin kuten ominaisenergiaan ja -tehoon. Yksittäisen akkukennon jännite ja muut ominaisuudet, kuten kapasiteetti, ovat suhteellisen pieniä, joten yksittäisiä kennoja yhdistetään sarjaan ja rinnakkain. Näin saavutetaan korkeampi jännite. Lisäksi myös muut ominaisuudet, kuten esimerkiksi kapasiteetti, skaalautuvat sarja- ja rinnankytkentöjen mukaisesti. [15]

Akkueenergiavarastot koostuvat muistakin osista kuin vain eri akkuteknologioiden akkukemioista ja näiden muodostamista akkuyksiköistä. Akun toiminnallisuuden kannalta tärkeässä roolissa on BMS eli akustonvalvontajärjestelmä. Lisäksi akkuenergiavaraston

kannalta tärkeää on huomioida Power Management System (PMS) eli tehonhallintajärjestelmät ja Power Conversion System (PCS) eli järjestelmän tehoelektronikka ja sen ohjaus. Nämä järjestelmät voivat välittää vielä tietonsa jollekin yhteiselle valvonta- ja ohjausjärjestelmälle. Yksi esimerkki tällaisesta järjestelmästä on Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA). PMS, PCS ja BMS yhteistoiminnallaan ohjaavat akkuenergiajärjestelmän toimintaa kokonaistilanteen perusteella ja välittävät tarvittavat komennot toisilleen saumattoman toiminnan takaamiseksi. BMS-järjestelmään sisällytyt toiminnallisuudet vaihtelevat riippuen akun koosta, tyypistä ja käyttötarkoituksesta. Kuva 3 esittelee yleiskuvaa akuston erilaisista hallintajärjestelmistä ja niiden yhteyksistä toisiinsa. [14][15]



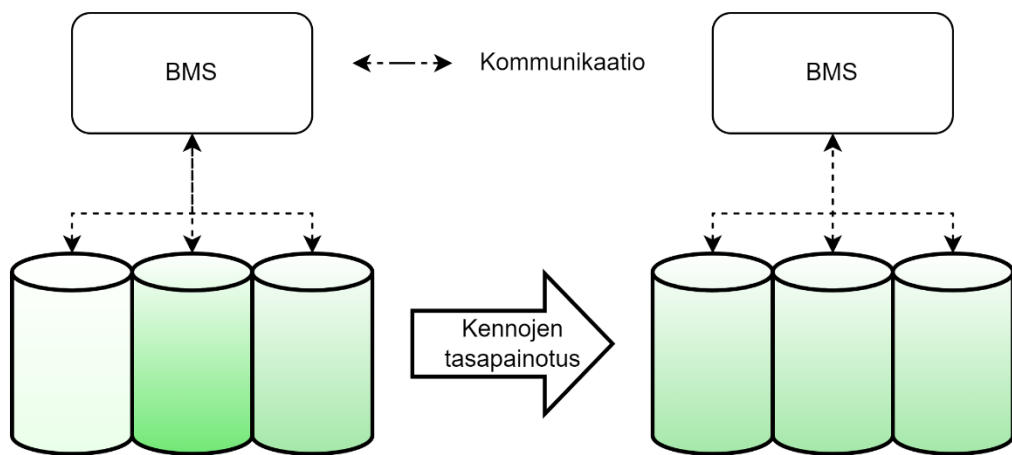
Kuva 3. Akkuenergiavaraston ohjausjärjestelmä, muokattu lähteistä [14] ja [15].

Kuva 3 osoittaa nuolilla yhteyden eri osien ja järjestelmien välillä. Esimerkiksi akkuyksiköistä on suora yhteys tehoelektronikkaan ja tehoelektronikalla on yhteys PCS-järjestelmään, joka pystyy arvioimaan koko akuston tilaa muiden järjestelmien tietojen avulla.

BMS-järjestelmän tarkoituksena on ohjata akuston toimintaa, ja pidentää akuston käyttöikää. BMS-järjestelmät voidaan jakaa ennakoimattomiin ja ennakoiviin, joista ennakoivien avulla pystytään hallitsemaan akuston tilaa paremmin. Ennakoimattomien BMS-järjestelmien avulla voidaan hallita lähinnä akuston tehoa [14]. Ennakoivien BMS-järjestelmien avulla pystytään hallinnoimaan laajemmin, sillä ne lukevat ja arvioivat virran ja jännitteen pohjalta akkujen sisäistä tilaa.

BMS-järjestelmän toiminta perustuu algoritmeihin ja erilaisiin funktioihin. Järjestelmä saa syötteenä akkujen tilatietoja jännitteestä ja virrasta, joiden pohjalta järjestelmä laskee esimerkiksi State of Charge (SoC) ja State of Health (SoH) arvot. Osa akkuteknologioista

ja -kemioista vaativat kennojen välisen varaustasapainon säilyttämisen. Tätä kutsutaan Cell Balancing -toiminnoksi, joka on suomeksi kennojen tasapainotus. Cell Balancing -toiminnossa BMS-järjestelmä jakaa akun kennojen kulutusta ja latausta älykkäästi, jotta yksittäisten kennojen välillä ei olisi eroavaisuuksia varaustilassa. Kuva 4 havainnollistaa tätä prosessia. Lisäksi BMS-järjestelmä huolehtii akulle asetettujen käyttötilanteen rajojen sisällä pysymisestä, eli esimerkiksi siitä, että akku pysyy ennalta asetettujen virta- ja jänniterajojen sisällä. Virtausakkujen tapauksessa BMS-järjestelmä kontrolloi elektrolyytin virtauksen määrää akun toiminnan ohjaamiseksi. On myös mahdollista lisätä muita räätälöityjä funktioita BMS-järjestelmään. [14][15]



Kuva 4. Akkukennojen tasapainottamisen periaatekuva.

PCS-järjestelmä eli tehoelektronikka ja sen ohjausjärjestelmä ovat oleellisessa osassa akkuenergiavaraston oikean toiminnan kannalta. PCS määrittelee akuston lataus- ja purkutehot BMS- ja PMS-järjestelmien tietojen pohjalta. [14][15] PCS-järjestelmän tehoelektronikka koostuu DC-AC suuntaajasta, jolla muutetaan akkuenergiavaraston tasavirta sähköverkon vaihtovirraksi ja oikeaan jännitetasoon. Järjestelmä toimii myös toiseen suuntaan, jotta akkuenergiavarastoa voidaan sekä ladata että purkaa. Lisäksi järjestelmän ja sähköverkon liittämiseksi saatetaan tarvita muuntajaa. [15]

PMS-järjestelmä saa tietoa suoraan verkon tilasta, jota se voi hyödyntää antaessaan komentoja PCS-järjestelmälle optimaalisen tehoelektronikan ohjauksen toteuttamiseksi. PMS-järjestelmä kerää tietoja esimerkiksi verkon taajuudesta ja jännitteestä ja sen tarkoituksena on hallita järjestelmän tehoa yhdessä PCS-järjestelmän kanssa. [15]

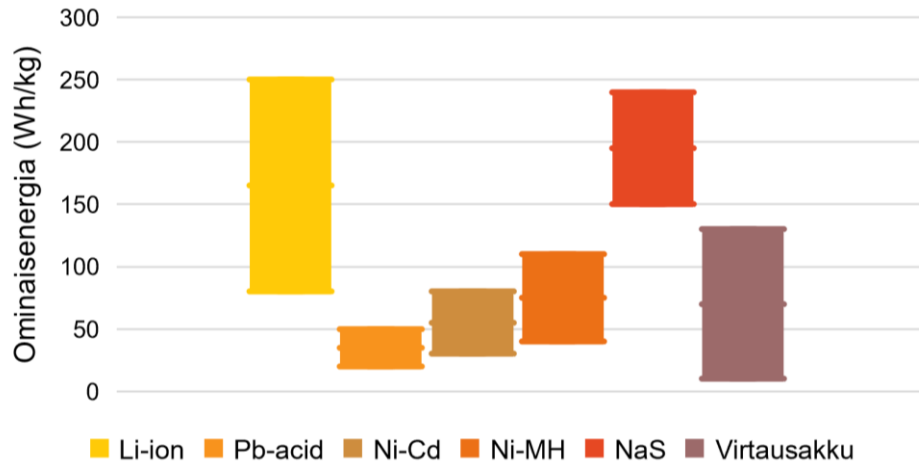
Edellä mainittujen järjestelmien nimeäminen ja kokoonpano saattavat vaihdella lähteestä toiseen, esimerkiksi lähteessä [14] PCS-järjestelmän ohjaavan logiikan nimi on Supervisory System Control (SSC), kun lähteessä [15] SSC on yhdistetty PCS-järjestelmän alle.

Lisäksi ulkoisen verkon tilaa seuraavaa erillistä PMS-järjestelmää ei ole erikseen kuvattu. Kuitenkin akkuenergiavaraston toiminnallisuuden pääperiaatteet pysyvät samoina eli tarvitaan tehoelektroniikan ohjausjärjestelmää ja korkeamman tason valvonta- ja ohjausjärjestelmää. Nämä tekevät tarvittavia mittauksia ja ohjauksia järjestelmän tilasta [14][15].

3.2 Akkuteknologioiden jaottelu

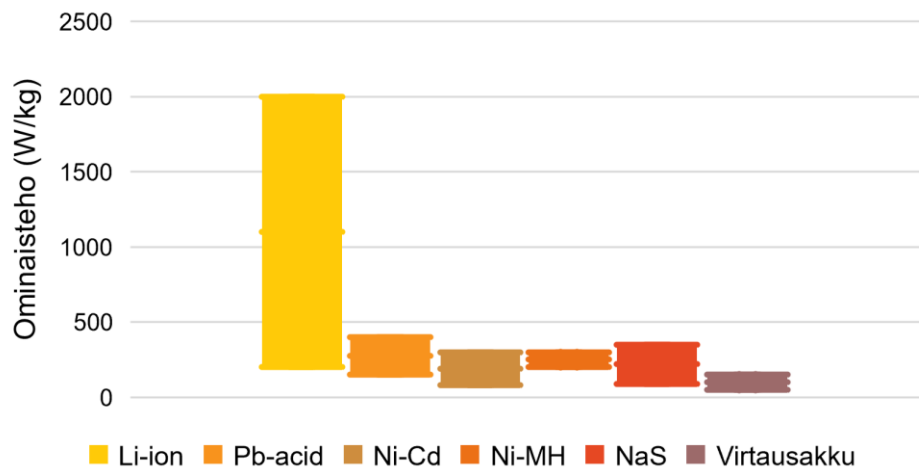
Akkuteknologiat voidaan jakaa primaarisiin ja sekundaarisiin, joista primaariset akut ovat ei-ladattavia akkuja, kun taas sekundaariset akut on suunniteltu lataamisen mahdollistaviksi akuiksi. [13] Keskitytään näistä sekundaarisiin akkuihin, sillä lataaminen on edellytys tarkasteltavassa käyttötarkoituksessa. Sekundaarisia akkuja on useita ja niiden ominaisuuksista tyypillisesti annettavia tietoja ovat kennojännite, ominaisenergia, ominaisteho, energiatiheys, tehotiheys, hyötysuhde, toimintalämpötila, akun varauksen purkusyvyys eli Depth of Discharge (DoD) ja elinikä lataussykleinä sekä vuosina. Ominaisenergia ja -teho kuvaavat akun kykyä varastoida energiaa tai tehoa massayksikköä kohden, kun taas energia- ja tehotiheys kuvaavat energiavaraston kykyä varastoida energiaa tai tehoa tilavuusyksikköä kohden. Näitä tietoja eri akkuteknologioille esitellään kuvissa 5 ja 6. Lisäksi jokaiselle käsitellylle akkuteknologialle on omassa alaluvussaan esitetty taulukko, jossa on näiden lisäksi myös muita edellä mainittuja tietoja. [13]

Kuva 5 esittelee akkuteknologioiden ominaisenergian vaihteluväliä lähteen [13] pohjalta. Esimerkiksi litiumioniakun ominaisenergiassa on suuri vaihteluväli, sillä litiumioniakkuja voidaan suunnitella siten, että painotetaan tiettyjä ominaisuuksia [4][10]. Muiden akkujen vaihteluväli on pienempi, mutta myös näissä akkujen suunnittelulla on vaikutusta arvoihin.



Kuva 5. Eri akkuteknologioiden ominaisenergiat [13].

Kuva 6 esittelee akkuteknologioiden ominaistehon vaihtelua lähteen [13] pohjalta. Isoin ominaisteho on saatavissa litiumioniakusta ja samalla litiumioniakussa on myös suurin vaihteluväli, joten sen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa eniten. Pienin ominaisteho on saatavilla virtausakusta, joka johtuu virtausakun vaatimasta ulkoisesta elektrolyyttisäiliöstä [13]. Seuraavissa alaluvuissa käsitellään muutamia yleisimpiä akkuteknologioita ja tulevaisuuden teknologioita, joita on noussut esiin lähteistä [4], [5], [13], [16], [17], [18] ja [19].



Kuva 6. Eri akkuteknologioiden ominaistehot [13].

3.2.1 Lyijyhappoakku – Pb-Acid

Ensimmäiset lyijyhappoakut eli Pb tai Pb-Acid-akut on tuotettu 1800-luvun loppupuolella. Kyseessä on siis varsin vanha akkuteknologia, mikä tekeekin siitä laajasti tutkitun. Lyijyakuissa onkin tapahtunut paljon kehitystä ensimmäisistä versioista. [20] Lyijyakuun toiminta pohjautuu lyijystä ja lyijydioksidista valmistettuihin elektrodeihin, jotka on upotettu

rikkihapon ja veden sekoitukseen [13]. Lyijyakkuja käytetään massavarastoina ja hybridienergiajärjestelmien yhteydessä. Lisäksi niitä saatetaan käyttää taajuuden säädössä käytettävissä järjestelmissä. [16]

Lyijyakun ominaisenergia ja ominaisteho ovat varsin pieniä verrattaessa litiumioniakkuihin, kuten voidaan lähteen [13] pohjalta muodostettujen kuvien 5 ja 6 pohjalta huomata. Lyijyakun ominaisenergia on 25–50 Wh/kg ja ominaisteho on 150–400 W/kg, kun litiumioniakulla vastaavat arvot ovat 80–250 Wh/kg ja 200–2000 W/kg. Samat tiedot on myös esitetty taulukossa 3. Lyijyakun painosta 2/3 tulee akun aktiivisista komponenteista [20] ja tästä seuraakin lyijyakun huonona puolena pidetty paino. Lyijyakun muita huonoja puolia ovat lyhyt elinikä, jota rajoittaa toimintalämpötila, pieni ominaisenergia ja -teho, purkusyvyyys (DoD), sekä korkea huollon tarve. Lyijyakkujen puolesta puhuu kuitenkin edullisuus, korkeahko hyötysuhde, kierrätyksen helppous sekä turvallisuus. [10][13][16]

Taulukko 3. *Lyijyakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].*

Ominaisuus	Arvo
Kennojännite (V)	2–2,1
Ominaisenergia (Wh/kg)	25–50
Ominiaisteho (W/kg)	150–400
Energiatiheys (Wh/l)	25–90
Tehotiheys (W/l)	10–400
Hyötysuhde (%)	63–90
Eliniän syklien lukumäärä (kpl)	250–2000
Elinikä (vuotta)	2–15
Purkusyvyyys (%)	80
Teholuokitus (MW)	0–20
Hinta per kWh (€/kWh)	40–170
Hinta per kW (€/kW)	250–500

3.2.2 Natriumrikkiakku – NaS

Natriumrikkiakun toiminta perustuu elektrodeihin, jotka ovat nestemäisessä tilassa ja niiden erottamisessa käytetään keraamista elektrolyyttiä. Elektrodien nestemäinen tila johtuu natriumrikkiakun korkeasta toimintalämpötilasta, joka on välillä 300–350 °C. Korkean lämpötilan vaikutuksesta yksittäisten syklien hyötysuhde pienenee, mutta samalla akun eliniän aikaisten syklien kokonaismäärä kasvaa. [13][16]

Natriumrikkiakut soveltuvat hyvin akkuenergiavarastoihin, johtuen niiden suuresta ominaisenergiasta, pitkästä eliniästä ja vähäisestä huollon tarpeesta johtuen. [13][16] Natriumrikkiakkujen ominaisenergian määrä liikkuu välillä 150–240 Wh/kg, kun litiumioniakkujen ominaisenergianmäärä voidaan valita välillä 80–250 Wh/kg. Ominiaistehossa natriumrikkiakku on samassa suuruusluokassa muiden akkuteknologioiden kanssa, kuten

kuvasta 6 voidaan huomata. Ainoan poikkeuksen muodostaa litiumioniakku, jonka ominaistehon vaihteluväli ja maksimiarvo ovat suurimmat. Lisäksi yksi natriumrikkiakun isoimmista eduista on sen eliniän aikaisten syklien lukumäärä. Natriumrikkiakun eliniän aikaisten syklien lukumäärä sijoittuu välille 2500–40000 sykliä [13][16]. Natriumrikkiakujen käyttöä rajoittavat kuitenkin niihin liittyvät turvallisuushuolet, jotka johtuvat korkeasta lämpötilasta [10][12], sekä korkeat kustannukset. Korkeasta lämpötilasta johtuvien turvallisuustoimien takia teknologia soveltuu lähinnä kiinteisiin asennuksiin [17]. Taulukossa 4 on kirjattuna ylös edellä mainittuja arvoja sekä muita natriumrikkiakulle tyypillisiä arvoja.

Taulukko 4. *Natriumrikkiakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].*

Ominaisuus	Arvo
Kennojännite (V)	1,8–2,71
Ominaisenergia (Wh/kg)	150–240
Ominaiseteheho (W/kg)	90–230
Energiatiheys (Wh/l)	150–350
Tehotiheys (W/l)	1,2–50
Hyötysuhde (%)	75–90
Eliniän syklien lukumäärä (kpl)	2500–40000
Elinikä (vuotta)	10–15
Purkusyvyyys (%)	100
Teholuokitus (MW)	0,05–34
Hinta per kWh (€/kWh)	250–420
Hinta per kW (€/kW)	850–2500

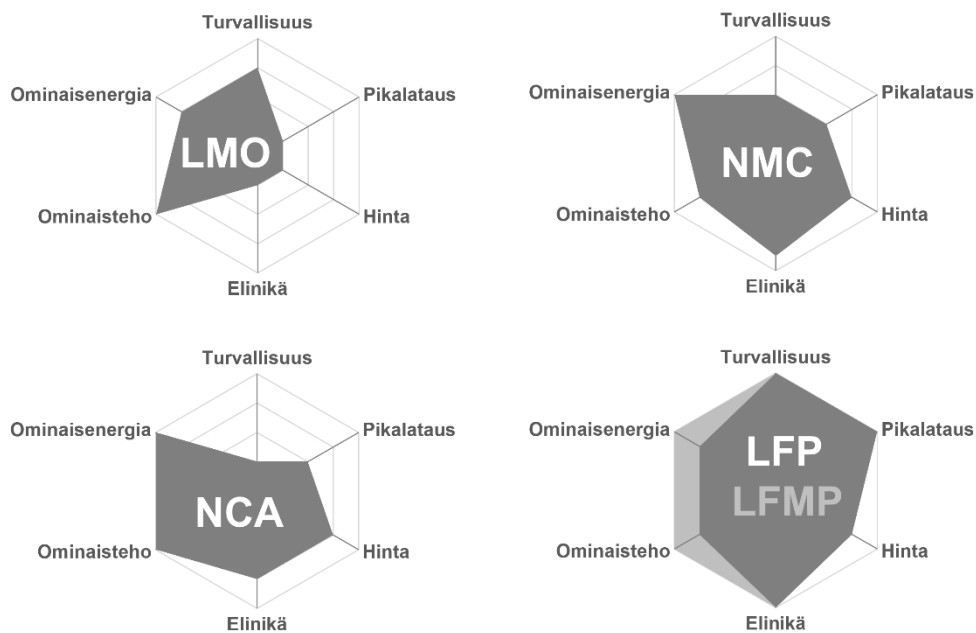
3.2.3 Litiumioniakut – Li-ion

Litiumioniakkujen markkinat ja käyttökohteet ovat hyvin laajat. Niitä käytetään aina puhelimista erilaisiin isompiin laitteisiin. Lisäksi litiumioniakut dominoivat energiavarastojen markkinoilla, sillä litiumioniakun ominaisuudet ja niiden muunneltavuus tekevät siitä erittäin houkuttelevan vaihtoehdon. Litiumioniakun vahvuuksia ovat korkea energiatiheys ja tehosiheys, pitkä elinikä ja kokonaissyklien korkea lukumäärä sekä korkea hyötysuhde. Litiumioniakuston heikkouksiin lukeutuvat korkea hinta, korkean lämpötilan haittavaikutukset ja tarve suojauslektroniikalle. [10][13][16][21][22]

Litiumioniakun toiminta perustuu kahden elektrodin, näiden välisen erottajakalvon ja elektrolyytin yhteistoimintaan. Litiumioniakkujen ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa vaihtamalla näiden elektrodien materiaaleja. Litiumioniakkujen toinen elektrodi on yleensä tehty grafiitista ja toisen elektrodin materiaalia vaihdellaan. [13] Yleisimmät litiumioniakuissa käytetyt elektrodimateriaalit ovat seuraavanlaiset: kobolttioksidi, litium-rautafosfaatti (LFP), mangaanioksidi (LMO), litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidi (NCA) ja nikkeli-

koboltti-mangaanioksidi (NMC) [10][21][23]. Näiden elektrodimateriaalien avulla nimeetään myös eri litiumakkuteknologiat. Tällöin akun toinen elektrodeista on valmistettu käyttäen edellä mainittuja yhdisteitä.

Näistä kobolttioksidia voidaan pitää standardiratkaisuna ja muut ovat vaihtoehtoja, sillä koboltti on kallista ja kaiken lisäksi sitä on saatavilla rajallisesti. Kobolttioksidin liittyy myös turvallisuusriskejä. Edellä mainituista vaihtoehtoista NMC ja LFP näyttävät vahvimmin kandidaateina isojen akkuenergiavarojen kanssa käytettäviksi teknologioiksi, sillä ne ovat halvempia ja turvallisempia verrattaessa muihin vaihtoehtoihin. Näistä LFP on todella turvallinen, mutta samalla sen kennojännite on 0,5 V pienempi kuin kobolttioksidin kennojännite. Lisäksi LFP-akun valmistusmateriaaleihin ei kuulu myrkyllinen ja harvinainen koboltti. NMC teknologiaan perustuvalla akulla on tyypillistä, että jännite laskee viettävästi. [23] Oheisessa kuvassa 7 on koottu eri litiumakkuteknologioiden ominaisuuksia lähteen [24] avulla. Näitä eri akkuteknologioiden ominaisuuksia on arvosteltu asteikolla 0–4, joista 4 on paras mahdollinen arvosana. Kuvassa selkeästi parhaimpana esiintyy litium-mangaani-rautafosfaatti (LFMP), joka on kehittyneempi versio LFP-akusta. Toiseksi parhaimpana vaihtoehtona on LFP-akku ja kolmantena vaihtoehtona voidaan pitää NMC-akkuja.



Kuva 7. Litiumakkuteknologioita ja niiden ominaisuuksia. Muokattu lähteestä [24].

Taulukko 5 kuvaa litiumioniakun ominaisarvoja, joiden pohjalta voidaan havaita litiumioniakun ominaisarvojen laaja skaala. Juuri tämä on se syy, minkä takia litiumioniakut ovat sopivia moniin eri käyttötarkoituksiin.

Taulukko 5. *Litiumioniakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].*

Ominaisuus	Arvo
Kennojännite (V)	2,5–5
Ominaisenergia (Wh/kg)	80–250
Ominais-teho (W/kg)	200–2000
Energiatiheys (Wh/l)	95–500
Tehotiheys (W/l)	50–800
Hyötysuhde (%)	75–97
Eliniän syklien lukumäärä (kpl)	100–10000
Elinikä (vuotta)	5–15
Purkusyvyyys (%)	100
Teholuokitus (MW)	0–100
Hinta per kWh (€/kWh)	500–2100
Hinta per kW (€/kW)	1000–3400

3.2.4 Nikkelikadmiumakku – Ni-Cd

Nikkelikadmiumakkuja käytetään pitkän aikavälin sovelluksissa, joissa tarvitaan pitkää elinikää akulta vaikeissa olosuhteissa. Nikkelikadmiumakun nimi johtuu akun valmistuksessa käytetyistä materiaaleista. Akun toinen elektrodeista on valmistettu nikkelioksihydroksidista, kun toinen elektrodeista on tehty kadmiumista. Elektrolyytinä akussa toimii kaliumhydroksidi. [13]

Nikkelikadmiumakun elektrodeissa käytetyt materiaalit ovat myrkyllisiä, joten akun valmistuksessa ja kierrätyksessä on oltava huolellisia. Muita huonoja puolia nikkelikadmiumakussa on muistiefekti, jossa jatkuva pieni lataus ja purku aiheuttaa akun kapasiteetin laskun ja eliniän lyhenemisen. Näiden lisäksi nikkelikadmiumakulla on varsin rajallinen tehotiheys. Nikkelikadmiumakun hinta on kallis verrattaessa lyijyhappoakkuihin, vaikka akkujen ominaisarvot ovat lähellä toisiaan, kuten voidaan huomata vertailemalla taulukoiden 3 ja 6 ominaisarvoja lyijyakulle ja nikkelikadmiumakulle. [16] Nikkelikadmiumakun ominaisenergia ja -teho ovat samassa tasossa muiden akkuteknologioiden kanssa. Hyvinä puolina nikkelikadmiumakuissa voidaan pitää akun eliniän syklien lukumäärää, akun ylläpitoon kuluvien resurssien vähäistä määrää ja sitä, että akkuteknologia soveltuu hyvin käytettäväksi pitkäaikaisvarastona. [10][13][16]

Taulukko 6. *Nikkelikadmiumakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].*

Ominaisuus	Arvo
Kennojännite (V)	1,2–1,3
Ominaisenergia (Wh/kg)	30–80
Ominaisteho (W/kg)	80–300
Energiatiheys (Wh/l)	15–150
Tehotiheys (W/l)	40–140
Hyötysuhde (%)	60–90
Eliniän syklien lukumäärä (kpl)	1000–5000
Elinikä (vuotta)	10–20
Purkusyvyyys (%)	80
Teholuokitus (MW)	0–40
Hinta per kWh (€/kWh)	680–1300
Hinta per kW (€/kW)	420–1300

3.2.5 Nikkelimetallihybridiaaku – Ni-MH

Nikkelimetallihybridiaakkuja käytetään useissa erilaisissa sovelluksissa, kuten älykkäissä energiavarastoissa, elektroniikassa ja vaikkapa ajoneuvojen akustoissa. Kyseinen akkuteknologia rakentuu elektrodeista, joista toinen on tehty vetyä sitovasta metalliseoksesta. Toinen elektrodeista on taas tehty nikkelioksihydroksidista, aivan kuten nikkelikadmiumakussa. Elektrolyytinä käytetään kaliumhydroksidia, kuten nikkelikadmiumakussa. [13]

Akkuteknologian hyvinä puolina lähteessä [13] pidetään hyvää kestävyyttä lataus- ja purkuvirtoihin, hyvää energiatiheyttä, syklien kokonaismäärän suuruutta, kierrätyksen helppoutta sekä hyvää toimintaa korkeissa lämpötiloissa. Näitä samoja puolia tuodaan esille myös lähteessä [10]. Huonoina puolina on hinta verrattaessa lyijyakkuihin, aivan kuten nikkelikadmiumakkujen kohdalla. Lisäksi akkuteknologia kärsii lähteen [13] mukaan huonosta toimintakyvystä alhaisissa lämpötiloissa, kun taas lähteessä [10] mainitaan parantunut toiminta alhaisissa lämpötiloissa. Lähteet ovat muuten yksimielisiä akkuteknologian positiivisista ja negatiivisista puolista, mutta tämän ominaisuuden kohdalla on selkeä ristiriita. Taulukko 7 sisältää nikkelimetallihybridiaakulle tyypillisiä ominaisarvoja.

Taulukko 7. *Nikkelimetallihybridiaakun ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].*

Ominaisuus	Arvo
Kennojännite (V)	1,2–1,35
Ominaisenergia (Wh/kg)	40–110
Ominaisteho (W/kg)	200–300
Energiatiheys (Wh/l)	40–300
Tehotiheys (W/l)	10–600
Hyötysuhde (%)	50–80
Eliniän syklien lukumäärä (kpl)	300–1800
Elinikä (vuotta)	2–15
Purkusyvyyys (%)	100
Teholuokitus (MW)	0,01–3
Hinta per kWh (€/kWh)	170–640
Hinta per kW (€/kW)	200–470

3.2.6 Virtausakku - VRFB

Tässä luvussa käsitellään vanadiumiin pohjautuvaa hapetus-pelkistysreaktiota hyödyntävää virtausakkua. Tämän akun englanninkielinen nimi on Vanadium-redox-flow-battery (VRFB). Virtausakut eroavat toimintaperiaatteeltaan muista akkuteknologioista, sillä niissä kahteen ulkoiseen elektrolyyttitankkiin varastoidaan positiivinen ja negatiivinen elektrolyytti, joita pumpataan sitten akun elektrodeille. Tämä mahdollistaa sen, että virtausakkujen teho- ja energiamäärittelyt voidaan tehdä erikseen, mikä ei ole mahdollista tavallisilla akkuteknologioilla [13][16]. Virtausakun tehon määrittelee virtausakun kennojen lukumäärä, kun taas energian määrittelee elektrolyytin määrä eli tankkien koko [13].

Virtausakulle energiatiheys ja tehotiheys ovat pienempiä kuin monen muun akkuteknologian, sillä ulkoisten elektrolyyttitankkien ja näiden käyttämien pumppujen tarve tekee akustosta kookkaamman. Näitä molempia pidetään virtausakkujen heikkouksina niin lähteessä [10] kuin lähteissä [11] ja [13]. Virtausakku tarvitsee tuekseen monimutkaisen monitorointi- ja ohjausjärjestelmän, jota voidaan pitää huonona puolena [10]. Hyviä puolia virtausakuissa ovat turvallisuus, akuston kestämiensä syklien lukumäärän suuruus sekä skaalautuvuus. Lisäksi virtausakkuja on hyvä käyttää pidempiaikaiseen energianvarastointiin, sillä virtausakkujen reagoitinopeus on suuri ja niillä voidaan varastoida energiaa pidemmiksi ajoiksi. [13] Taulukko 8 on yhteenvetotaulukko virtausakun ominaisarvoista.

Taulukko 8. Virtausakun (VRFB) ominaisarvoja, muokattu lähteestä [13].

Ominaisuus	Arvo
Kennojännite (V)	1,2–1,4
Ominaisenergia (Wh/kg)	10–130
Ominais-teho (W/kg)	50–150
Energiatiheys (Wh/l)	10–33
Tehotiheys (W/l)	2,5–33
Hyötysuhde (%)	75–90
Eliniän syklien lukumäärä (kpl)	10000–16000
Elinikä (vuotta)	5–15
Purkusyvyyys (%)	100
Teholuokitus (MW)	0,03–3
Hinta per kWh (€/kWh)	130–850
Hinta per kW (€/kW)	500–1300

3.2.7 Tulevat akkuteknologiat

Akkuteknologiaa kehitetään jatkuvasti ja tälläkin hetkellä tutkimuksen kohteena on useampia potentiaalisia akkuteknologioita [13]. Lähteessä [25] käsitellään akkuenergiavarojen nykytilannetta ja käydään laajasti läpi eri akkuteknologioiden tulevaisuuden näkymiä ja tulevia akkuteknologioita. Tässä ei käydä läpi kaikkia lähteessä [25] mainittuja potentiaalisia tulevaisuuden akkuteknologioita, vaan niistä on poimittu muutamia potentiaalisimpia. Lisäksi poimintana tähän on otettu litiumpolymeeriakut, joiden uskotaan olevan yksi potentiaalinen kehityssuunta litiumakkujen saralla.

Litiumpolymeeriakut eli LiPO-akut ovat litiumakkuja, jotka pohjautuvat orgaanisen elektrolyytin sijasta kiinteään polymeeriin pohjautuvaan elektrolyyttiin. Kiinteä elektrolyytti tuo mukanaan useita etuja. Esimerkiksi akun muodon saa valita vapaammin, elektrolyytin vuotoriski poistuu, akun kestävyys lataus- ja purkusyklien aiheuttamiin rasituksiin on parempi ja akun vuotovirta on pienempi. Toisaalta LiPO-akuissa on vielä paljon kehitettävää, mutta ne ovat tulevaisuuden kannalta yksi selkeä tutkimuksen ja kehityksen suunta. [26]

Li-air-akut ovat litiumakkuja, jotka hyödyntävät ilmasta saatavaa happea akkukemiasaan. Li-air-akut ovat tulevaisuuden kannalta lupaava akkuteknologia, sillä niiden ominaisenergian määrän uskotaan olevan lähellä polttoaineena käytetyn bensiinin ominaisenergiaa [18]. Lisäksi kehitteillä on muita metalli-ilma-akkuja, joiden teoreettiset luvut vaikuttavat potentiaalisilta, mutta käytännön luvut ovat vielä toistaiseksi olleet heikkoja. [25]

Toinen potentiaalinen akkuteknologia on natriumiin pohjautuvat akut eli Na-ion-akut. Nämä teknologiat ovat lupaavia, sillä natriumin ja litiumin kemialliset ominaisuudet ovat samankaltaiset. Natriumia on saatavilla runsaasti, toisin kuin litiumia, jonka takia natrium

on huomattavasti halvempi materiaali kuin litium. [18] Natriumioniakkujen uskotaankin olevan vahvassa asemassa jopa syrjäyttämään litiumioniakut lähitulevaisuudessa [25].

Lisäksi erinomaista potentiaalia lähteen [25] mukaan on vetykaasuun pohjautuvissa energiavarastointiratkaisuissa sekä VRFB-akuissa. Näiden energiavarastointiratkaisujen potentiaali on suurimmillaan sovelluksissa, joissa turvallisuuden ja hinnan merkitys on ratkaiseva.

3.3 Akustojen vertailu

Edellä on avattu yleisimpiä ja käytetyimpiä akkuteknologioita ja niiden ominaisuuksia, heikkouksia ja hyviä puolia. Seuraavaksi tarkastellaan yhteenvetona eri akkuteknologioiden mahdollisuuksia menestyä energiavarastona. On hyvä huomata, että ideaalia vaihtoehtoa ei ole edes saatavilla ja parhaassa vaihtoehdossa pitäisi hyödyntää montaa eri akkuteknologiaa, joiden avulla toteutettaisiin hybridiratkaisu [25]. Tämä ei aina ole mahdollista, joten on mahdollista, että joudutaan tekemään kompromissi eri ominaisuuksien välillä. Taulukko 9 sisältää edellä läpikäytyjen akkuteknologioiden ominaisarvot, pois lukien tulevaisuuden akkuteknologiat. Tulevaisuuden akkuteknologioista käydään läpi vain niiden mahdollisuudet tulevaisuudessa alaluvussa 3.2.7 mainittujen asioiden pohjalta ja samalla pohditaan, mitä teknologioita kannattaa pitää silmällä tuotekehityksessä.

Taulukon 9 sisältämät arvot on korostettu eri akkuteknologioiden välillä pohjaväriin tummennuksella. Tummin pohjaväri tarkoittaa akkuteknologian tietyn ominaisuuden parasta tai parhaimpia ominaisarvoja, hieman vaaleampi tumma pohjaväri tarkoittaa keskinkertaisia ominaisarvoja ja valkoinen pohja kuvastaa heikoimpia ominaisarvoja. Pohjavärien tummennuksella pyritään helpottamaan taulukon sisältämien lukujen hahmottamista suhteessa toisiinsa ja auttamaan eri akkuteknologioiden vertailussa.

Eniten parhaita arvoja on litiumioniakuilla ja toiseksi eniten niitä on natriumrikkiakuilla. Voisi siis päätellä, että litiumioniakku on selkeä valinta parhaimmaksi akkuteknologiaksi. Sitä se usein onkin, mutta sen heikkoudet turvallisuuden ja hinnan suhteen luovat myös muille teknologioille mahdollisuuksia. Natriumrikkiakut ovat yksi soveltuvimmista ratkaisuista akkuenergiavarastointiin, sillä niillä on hyvä elinikä ja hyvät arvot ominaisenergialle ja energiatiheydelle. Myös niiden käyttöä rajoittavat turvallisuushuolet, jotka juontuvat akun korkeasta toimintalämpötilasta. [13][16]

Taulukko 9. Eri akkuteknologioiden ominaisarvot, muokattu lähteestä [13].

Ominaisuus	Pb-acid	NaS	Li-ion	Ni-Cd	Ni-Mh	Virtausakku
Kennojännite (V)	2–2.1	1.8–2.71	2.5–5	1.2–1.3	1.2–1.35	1.2–1.4
Ominaisenergia (Wh/kg)	25–50	150–240	80–250	30–80	40–110	10–130
Ominaisteho (W/kg)	150–400	90–230	200–2000	80–300	200–300	50–150
Energiatiheys (Wh/l)	25–90	150–350	95–500	15–150	40–300	10–33
Tehotiheys (W/l)	10–400	1.2–50	50–800	40–140	10–600	2.5–33
Hyötysuhde (%)	63–90	75–90	75–97	60–90	50–80	75–90
Eliniän syklit (kpl)	250–2000	2500–40000	100–10000	1000–5000	300–1800	10000–16000
Elinikä (vuotta)	2–15	10–15	5–15	10–20	2–15	5–15
Purkusyvyys (%)	80	100	100	80	100	100
Teholuokitus (MW)	0–20	0.05–34	0–100	0–40	0.01–3	0.03–3
Hinta per kWh (€/kWh)	40–170	250–420	500–2100	680–1300	170–640	130–850
Hinta per kW (€/kW)	250–500	850–2500	1000–3400	420–1300	200–470	500–1300

Litiumioniakun valinnassa huomiota on syytä kiinnittää eri elektrodimateriaaleihin ja niiden tuomiin ominaisuuksiin. Eri elektrodimateriaalit vaikuttavat akun ominaisenergiaan ja -tehoon. Lisäksi elektrodimateriaalien valinnalla on merkitystä akun turvallisuuden kannalta. Jos halutaan turvallinen, kestävä ja halpa litiumioniakku, käytetään toisen elektrodin valmistuksessa rautafosfaattia. Tällöin akku on tehty hyödyntäen LFP-akuteknologiaa. LFP-akuista voidaan saada lähteen [27] mukaan jopa 20 % lisää ominaisenergiaa ja -tehoa LFP-akkujen kehittyessä. Näihin lupauksiin kannattaa suhtautua varautuneesti, sillä akkujen laboratoriotulokset eivät välttämättä siirry käytännön sovelluksiin. Lisäksi LFP-akkuja voidaan kehittää lisäämällä niihin mangaania, jolloin saadaan LFMP-akku. Kuten kuvasta 7 nähdään, on LFMP-akku LFP-akkua parempi. Myös NMC-akut ovat hintansa ja ominaisenergiansa puolesta hyviä valintoja, mutta niiden turvallisuus ei ole yhtä hyvällä tasolla verrattaessa LFP-akkuihin. [23][25][27]

Lyijyhappoakut ovat hyvä valinta, kun halutaan halpa massavarastointiratkaisu, jota ei tarvitse purkaa ja ladata useasti. Nikkelikadmiumakkuja kannattaa harkita, kun tarvitaan kestäväää akkua pitkän aikavälin ratkaisuun. Molempien haittapuolena on valmistuksessa käytetyt myrkylliset materiaalit, ja näiden akkuteknologioiden uskotaan korvautuvan muilla vaihtoehdoilla tulevaisuudessa [19].

Virtausakuista VRFB-akustot ovat hyvä valinta suuriin sovelluksiin ja isoihin energiavarastoihin niin nykyisessä tilassaan, kuin tulevaisuudessakin kehityksen myötä [25]. VRFB-akkujen etuna on kustannuksien suuruus verrattaessa muihin akkuteknologioihin suurien energiavarastojen tapauksessa sekä korkea turvallisuus.

Tulevaisuuden akkuteknologioista Li-air-akut näyttävät lupaavia tuloksia ja niiden ominaisenergiämäärän on arvioitu lähestyvän polttoaineena käytetyn bensiinin ominaisenergiämäärää [18]. Lisäksi Na-ion-akkuteknologia vaikuttaa lupaavalta materiaalien saatavuuden takia, ja koska se on hyvin samankaltainen kemiallisilta ominaisuuksiltaan verrattaessa litiumakkuihin.

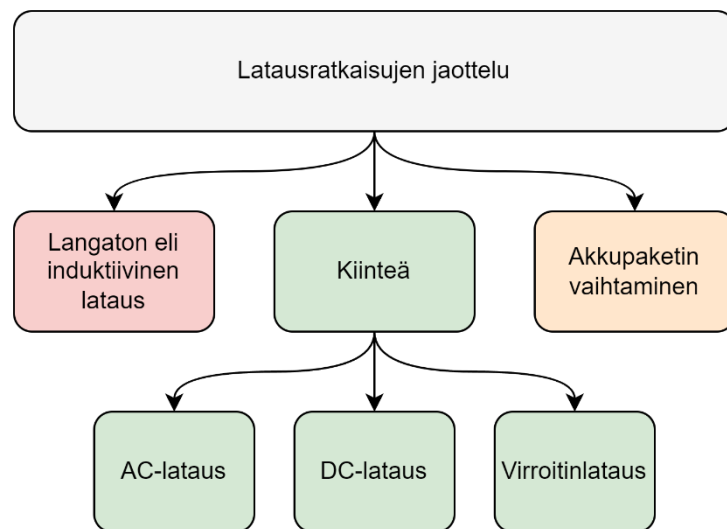
Kuten luvussa 2.2 pohdittiin, latausratkaisujen sijoituspaikka ei välttämättä mahdollista isoja energiavarastoja, joten ominaisenergian ja -tehon sekä energia- ja tehotehden merkitys on suuri. Mitä isompia nämä arvot ovat, sitä isompia energioita ja tehoja on mahdollista pakata pieneen tilaan, mikä on tällaisessa sovelluksessa tärkeää.

Yhteenvedona tulevaisuuden kannalta on kannattavaa pitää silmällä kehittyviä akkuteknologioita, kuten vetyperustaisia akustoratkaisuja sekä Na-ion-, LiPO- ja Li-air-akkuteknologioita. Akkujen kehitys on jatkuvaa ja tulevien akkuteknologioiden tuomat hyödyt voivat olla suuria [25]. Siksi tuotekehityksessä on tärkeää orientoitua seuraamaan akkuteknologioiden kehitystä ja valmistautua tekemään tarvittavia muutoksia käytettyihin akkuteknologioihin. Tällä hetkellä energiavarastoa suunniteltaessa latausratkaisujen integraatiossa kannattaa miettiä litiumioniakkuja, jotka on valmistettu hyödyntäen LFP- tai LFMP-tekniologiaa, jos turvallisuus on etusijalla. NMC-tekniologioita kannattaa miettiä, kun halutaan varastoida energiaa pienempään tilaan. Myös muut litiumioniakut ovat vaihtoehtoja, mutta edellä mainittujen ominaisuudet niin kierrätyksen kuin ominaisarvojen puolesta ovat paremmat. Lisäksi natriumrikkiakut voivat soveltua käytettäväksi ominaisarvojensa puolesta, jos niiden turvallisuusvaatimukset otetaan huomioon. Näiden lisäksi virtausakut voivat soveltua käytettäväksi isojen latausratkaisujen yhteydessä.

4. SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSRATKAISUT

Sähköajoneuvojen toiminta pohjautuu sähköenergiaan sekä liike-energiaan. Sähköenergiaa voidaan varastoida suoraan sähköajoneuvossa olevaan akustoon, josta sitä voidaan muuntaa sähkömoottoreiden avulla liike-energiaksi. Tätä varten tarvitaan latausratkaisuja, joilla sähköenergiaa voidaan ladata akustoon. Sähköajoneuvojen lataukseen liittyy useita muuttujia ja lataukseen onkin kehitetty useita erilaisia ratkaisuja.

Latausratkaisut voidaan jakaa kiinteisiin ja langattomiin, joista kiinteitä ratkaisuja on kaapelilataus sekä virroitinlataus. Langaton lataus on nimensä mukaisesti latausratkaisun tyyppi, jossa ladattavaan kohteeseen ei luoda suoraan fyysistä yhteyttä. Kiinteät kaapelilatausratkaisut jaetaan vielä AC- ja DC-latausratkaisuihin. Virroitinlatauksessa ajoneuvon katolla on virroitin, joka nostetaan kiinni ajoneuvon yläpuolella olevaan ajojohtimeen. Ajojohdin on jännitteellinen, jolloin virroitimen kautta saadaan siirrettyä tehoa ajoneuvoon ja sen akustoon. Kuvassa 8 on esitettyä latausratkaisujen jaottelu. [28][29][30]



Kuva 8. Latausratkaisujen jaottelu. [28][30]

Seuraavaksi käsitellään sähköajoneuvojen latausratkaisujen toimintaperiaatetta, miten latausratkaisujen kommunikaatio toimii ja käsitellään eri lataustapoja. Tarkoituksena on koostaa pohja, miten latausratkaisut toimivat ja mitä asioita pitää ottaa huomioon, jotta niihin on mahdollista linkittää energiavarasto.

4.1 Lataustavat

Kaapelilataukseen perustuvat sähköajoneuvojen latausratkaisut voidaan jaotella AC- ja DC-lataukseen. Näistä tarkempi jaottelu perustuu eri lataustapoihin, jotka ovat Mode 1–4. Näistä Mode 1 on ns. ”kevytlataus”, Mode 2 on hidaslataus, Mode 3 on peruslataus ja Mode 4 pikalataus. Lataustavat 1–3 pohjautuvat AC-lataukseen ja lataustapa 4 pohjautuu DC-lataukseen. [29]

Mode 1 on hyvin yksinkertainen AC-latauksen tapa. Tässä lataustavassa latauskaapelin toinen pää kiinnitetään joko tavalliseen sukopistorasiaan tai kolmivaiheiseen pistorasiaan. Pistorasiasta otettava maksimivirta saa olla korkeintaan 16 A. Mode 1 -lataustapa on käytössä hyvin rajallisesti ja niissäkin valikoiduissa käyttökohteissa, kuten sähköisten mönkijöiden tai skoottereiden lataamisessa. [29][33] Tässä lataustavassa ei ole suojaukseen liittyviä laitteita, jonka takia se on turvaton ja käyttöä ei suositella nimenomaan turvallisuuden takia [30].

Hidaslataus eli Mode 2 -lataus on edistyneempi versio Mode 1 -latauksesta. Hidaslataus on tarkoitettu tilapäiseen käyttöön, kun lataustapaa 3 ei ole saatavilla. Hidaslatauksessa latauskaapelissa on ohjausyksikkö, joka keskustelee auton kanssa latauksesta. Tätä ohjausyksikköä kutsutaan yleensä nimellä ”in-cable control and protection device” (IC-CPD). Se voi kulkea myös nimellä ”supply equipment communication controller” (SeCC), mutta tätä termiä käytetään lähinnä lataustapojen 3 ja 4 tapauksessa. Tässä ohjausyksikössä on standardin SFS-EN IEC 61851-1 [31] mukaiset ohjaus- sekä suojaustoimet. Lisäksi ajoneuvon ja latauspisteen välisestä kommunikaatiosta on kerrottu SFS-EN ISO 15118 -sarjassa [32]. Suojaustoimien tarkoituksena on pitää latauskaapeli jännitteettömänä, jos latauskaapeli ei ole yhdistettynä ladattavaan sähköajoneuvoon, sekä tarvittaessa keskeyttää lataus. Ohjausyksikössä on lisäksi vielä vikavirtasuojaus. Autossa on myös ohjausyksikkö, joka kulkee nimellä ”electric vehicle communication controller” (EvCC). Ohjausyksiköiden avulla sekä sähköajoneuvo, että latausratkaisu voivat kommunikoida toisilleen hyödyntämällä pulssimoduloitua signaalia. Sähköajoneuvo kuitenkin hallinnoi lataustapahtumassa ajoneuville ja sen akulle syötettävää virtaa. Tätä samaa ohjauslogiikkaa käytetään myös peruslatauksessa. [29][30][32][33]

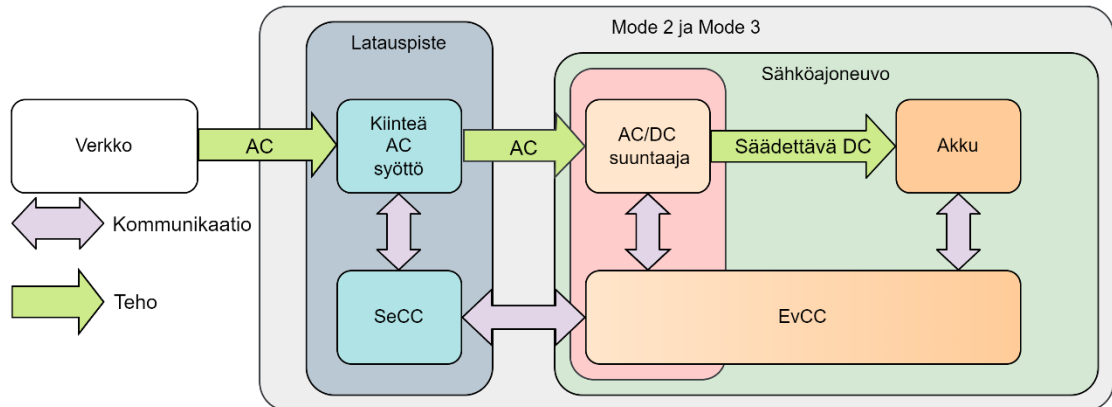
Peruslataus eli Mode 3 -lataus on kiinteä tai puolikiinteä latausratkaisu, joka on suunniteltu alusta loppuun sähköajoneuvojen lataukseen, ja ratkaisu voi olla joko yksi- tai kolmevaiheinen, jolloin latausteho vaihtelee suunnitellun latausvirran mukaisesti välillä 1,4–43 kW [29][30]. Ratkaisun latauskaapeli voi olla kiinteästi asennettuna tai laturissa on pistorasia standardin mukaiselle latauskaapelille. Mode 3 -peruslatauksessa käytet-

tävän latauskaapelin pistokkeet ovat standardin SFS-EN 62196-2 [34] mukaisia. Standardin mukaisia pistokkeita ovat tyyppin 2 ”Mennekes”, tyyppin 1 ”Yazaki” sekä tyyppin 3 ”Scame”, joista kaksi jälkimmäistä ovat Suomessa harvinaisia. Latausratkaisun SeCC on kiinteästi sijoitettuna latausratkaisun sisään ja sen toiminnallisuudet ovat samat kuin Mode 2 -lataustavalla. Sähköajoneuvo ei pysty erottamaan Mode 2- ja Mode 3 -lataustapoja toisistaan. [29][33]

Pikalatauksessa laturi syöttää autolle tasasähköä vaihtosähkön sijasta. Lataustavalle 4 käytetään erilaisia nimityksiä kuten teho-, suurteho- ja DC-lataus. [29] Pikalataukselle latausteho voi olla jopa 400 kW, mutta tyyppillinen latausteho on 50 kW luokkaa [30]. Lataustehoon vaikuttaa kuitenkin myös auton suunnittelu ja akun lämpötila [29]. Pikalatauksessa käytettävät pistokkeet ovat standardin SFS-EN 62196-3 [35] mukaiset. Standardin mukaisiin pistoketyyppeihin sisältyy Tyyppin 4 AA eli ”CHAdEMO” sekä Tyyppin 4 FF eli ”CCS2 (Combo 2)”. Lataustavassa 4 SeCC-ohjausyksikkö on sijoitettu kiinteästi latausratkaisun sisään ja sen toiminnallisuuksiin kuuluu ohjaus-, kommunikaatio- ja turvallisuusratkaisut. Lataustavassa 4 kommunikaation on oltava korkean tason digitaalista kommunikaatiota [32]. Tulevaisuudessa nämä eri pistokkeet ja niiden vastaavat standardit saattavat yhdistyä yhdeksi harmonisoiduksi kokonaisuudeksi. [30][33]

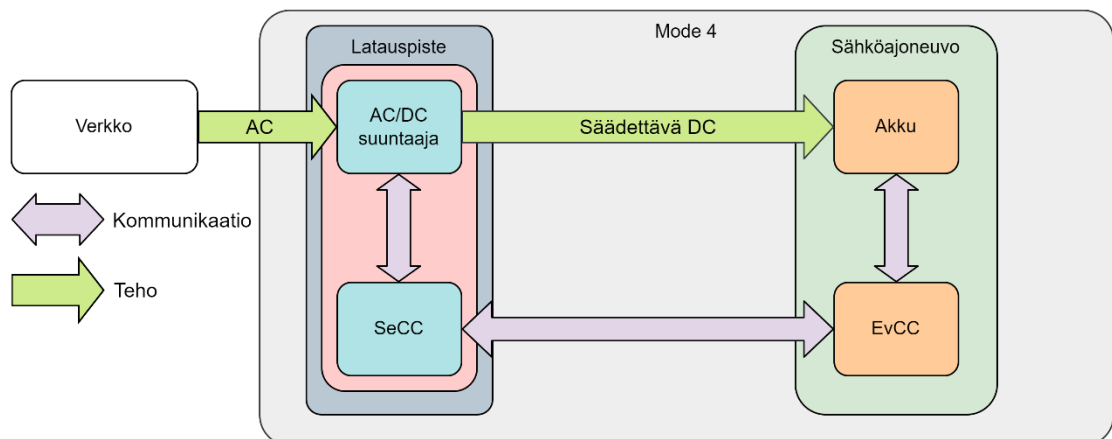
4.2 Toimintaperiaate

Lataustapojen 2 ja 3 toimintaperiaate on sama. Lataustavat 2 ja 3 pohjautuvat AC-lataukseen, jossa ajoneuvon sisäänrakennetut komponentit hoitavat muunnoksen vaihtosähköstä akuston tarvitsemaan tasasähköön. Lataustapojen 2 ja 3 yhteydessä latauspisteeseen tuodaan aina kiinteä AC-syöttö. Kuva 9 esittää lataustapojen 2 ja 3 toiminnallisuutta ja eri komponentteja, joita latausratkaisut sisältävät. Kuvan tarkoituksena on havainnollistaa kokonaisuuden toimintaa. Kuvassa latauspisteellä tarkoitetaan sähkön syötön ja ohjausyksikön kokonaisuutta. Latauspisteestä teho siirtyy sähköajoneuvon standardin mukaiseen pistokkeeseen kaapelia pitkin, jossa sähköajoneuvon latausjärjestelmät hoitavat AC/DC-suuntauksen, tuottaen säädettävän DC-syötön akulle. Latausta säätelee sähköajoneuvon ohjausyksikkö EvCC sekä latauspisteen ohjausyksikkö SeCC. Eri ohjausyksiköt ovat yhteydessä toisiinsa ja kommunikoivat toisilleen tarvittaessa. Kommunikaatiolla mahdollistetaan esimerkiksi latauksen tilan ilmoittaminen, lataustehon säätely ja turvallisuustoiminnot. [29][30]



Kuva 9. Mode 2- ja Mode 3 -lataustapojen toimintaperiaate.

Lataustapa 4 eroaa merkittävästi lataustavoista 2 ja 3, sillä kyseisessä lataustavassa sähköajoneuvon AC/DC-suuntaaja ohitetaan ja ajoneuville syötetään standardin mukaiseen pistokkeeseen suoraan tasasähköä. Latauspisteeseen tulee kiinteä AC-syöttö, joka tasasuunnataan latauspisteeseen sijoitetulla AC/DC-suuntaajalla. Syötettävää tasasähköä ohjaava SeCC-ohjausyksikkö on sijoitettu latauspisteeseen, joka puolestaan kommunikoi sähköajoneuvon EvCC-ohjausyksikön kanssa. Ohjausyksiköt kommunikoivat keskenään välittäen tietoa latauksen tilasta, turvallisuustoiminnoista sekä lataustehon hallinnasta. Kuva 10 havainnollistaa lataustavan 4 toimintaa sekä eri komponentteja. [29][30][32]



Kuva 10. Mode 4 -lataustavan toimintaperiaate.

4.3 Kommunikaatio

Latausratkaisujen kommunikaatiosta on säädelty standardisarjoissa SFS-EN ISO 15118 ja SFS-EN IEC 61851. [31][32] Lataustapojen 1, 2 ja 3 yhteydessä korkean tason digitaalista kommunikaatiota ei edellytetä, mutta lataustavan 4 yhteydessä se on standardin

mukaan pakollinen [32]. Lataustapojen 2 ja 3 kommunikointi IC-CPD- tai SeCC -ohjausyksiköiden kanssa on toteutettu perustason kommunikaatiolla, jossa kommunikaatio sisältää vain välttämättömät latauksen tiedot ja ohjaukset. Kommunikatio on pulssisuhdemodulointiin perustuvaa, jossa jännitteen eri arvoilla ja pulsseilla pystytään välittämään standardoituja viestejä latausjärjestelmälle. Näihin kommunikoinnin viesteihin lukeutuvat kaapelin lukitseminen sähköajoneuvoon, ajoneuvon kytketymisen tila, onko ajoneuvo valmis vastaanottamaan latausta sekä mikä on sallitun latausvirran suuruus [31]. [36]

Latauksen tapahtuessa CCS-tyyppisellä laturilla, korkean tason kommunikaatio tehdään Power Line Communication (PLC) -tekniikalla. Samaa tekniikkaa käytetään sähkövoimajärjestelmän kommunikaatiossa, mistä myös tekniikan nimi tulee. PLC-tekniikan kommunikaatio toteutetaan moduloimalla tietovirta PWM-signaaliin, joka kulkee latauskaapelin Control Pilot (CP) ja Protective Earth (PE) johtimien kautta [29][31][36]. CHAdeMO-tyyppistä latausta käytettäessä kommunikaatio tapahtuu Controller Area Network (CAN) -väylää pitkin. CAN-väylä on käytössä ajoneuvoissa ja sen toiminta ei vaadi erillistä isäntää tilaviestinnän toteutumiseksi. Korkean tason kommunikaatioon sisältyy toiminnallisuksia kuten yhteensopivuuden varmistus, komponenttien fyysiset rajat, energian tarve sekä laturin ja ajoneuvon välisen yhteyden auktorisointi ja maksun suorittaminen. Viimeksi mainittu kulkee myös nimellä Plug 'n Charge [29]. [36][37]

Latauspisteen ja taustajärjestelmien kommunikaatiota varten on saatavilla useita avoimia rajapintoja, joista tässä esimerkkeinä Open Charge Point Protocol (OCPP) ja Open Smart Charging Protocol (OSCP) [38]. OCPP toimii välittämällä latausratkaisun ja keskitetyn palvelimen välillä dataa WebSocket-protokollan ylitse, joko SOAP/XML- tai JSON-muodossa. Tällaisen rajapinnan tarkoituksena on mahdollistaa käyttäjän tunnistaminen, toteuttaa maksujen välittäminen ja mahdollistaa latauspisteiden käyttäminen etänä sekä niiden statuksen seuraaminen. [39]

4.4 Latausratkaisujen yhdistäminen verkkoon

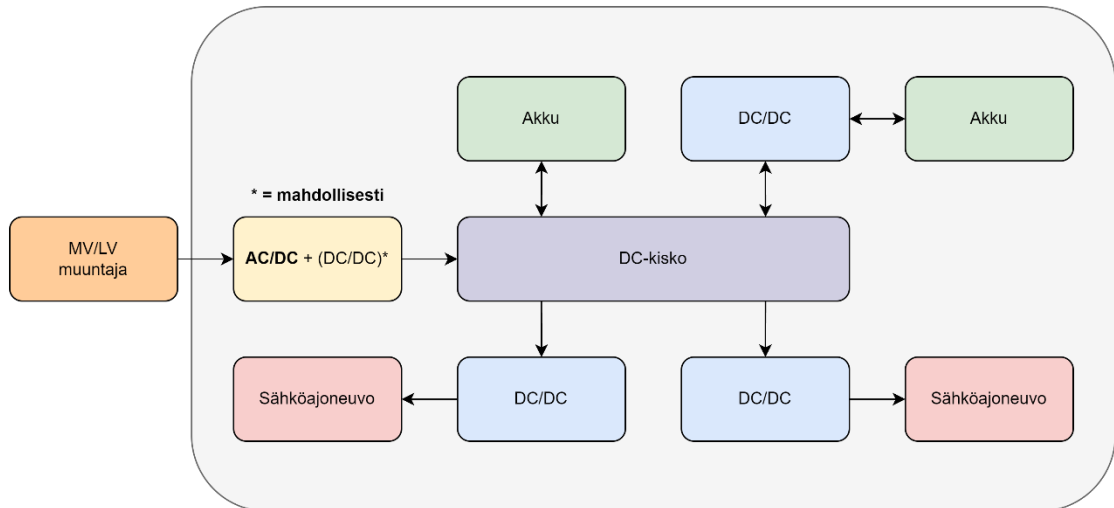
Ajoneuvojen latausratkaisujen verkkointegraatiossa on monia erilaisia tapoja. Latausratkaisun lataustapa määrittää tehdäänkö tarvittavat muutokset ajoneuvon akustolle syötettävään sähköön joko autossa itsessään (AC-lataus), tai sitten ulkoisesti latausratkaisussa (DC-lataus), kuten kuvista 9 ja 10 voidaan huomata. Kyseisissä kuvissa on esiteltyä vain yleinen toimintaperiaate, sillä käytännössä AC/DC-suuntaajan kanssa voi olla ja usein onkin DC/DC-suuntaaja sarjassa. Lisäämällä DC/DC-suuntaaja voidaan laajentaa mahdollisuuksia, joilla latausratkaisua ohjataan. Esimerkiksi lisäämällä erillinen

DC/DC-suuntaaja latausratkaisuun on mahdollista vaikuttaa latausratkaisun sähkönlaatuun vaikuttaviin tekijöihin, kuten tehokertoimeen ja harmonisiin taajuuksiin. Tätä ratkaisua voidaan siis käyttää niin sähköajoneuvon sisäisen laturin kanssa, kuin myös ulkoisen DC-laturin kokoonpanossa.

Erilaisten ratkaisujen mahdollisuuksien kirjo on varsin laaja, sillä DC/DC-suuntaajia voidaan tehdä usealla erilaisella topologialla, jotka pyrkivät eri lopputuloksiin. Sama asia voidaan myös todeta AC/DC-suuntaajasta, josta on myös olemassa useita erilaisia topologioita, jotka pyrkivät tekemään tiettyjä parannuksia niiden toimintaan tai tekemällä uusien ominaisuuksien lisäämisen mahdolliseksi. Näillä valinnoilla on myös vaikutusta latausratkaisun mahdollisuuteen osallistua Vehicle-to-Anything (V2X) -ratkaisuihin. Mainittakoon tässä esimerkkeinä Vehicle-to-Grid (V2G) tai Vehicle-to-Load (V2L). V2X-ratkaisuihin osallistuminen vaatii suuntaajan, joka mahdollistaa syötetyn sähkön suuntauksen verkosta sähköajoneuvon ja sähköajoneuvosta verkon suuntaan. [30][40][41][42]

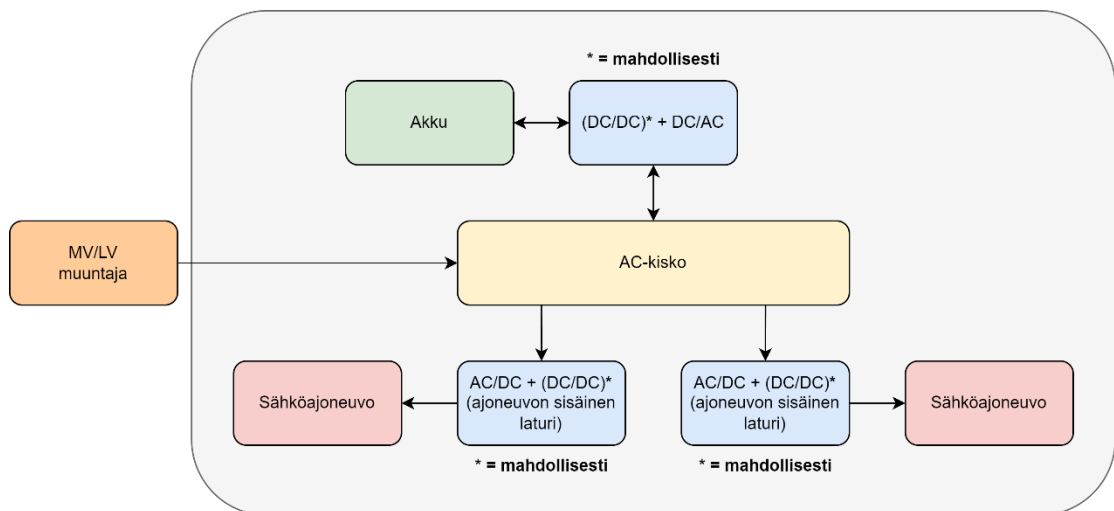
4.5 Latausratkaisujen ja energiavarojen käytännön yhdistäminen

Lähteessä [12] on esitelty erilaisia käytännön tapoja, miten latausratkaisuja yhdistetään verkkoon. Samassa lähteessä, sekä lähteessä [43] on esitelty myös erilaisia tapoja, miten energiavaroja voidaan liittää latausratkaisujen kanssa. Nämä voidaan jaotella ratkaisuihin, joista toisessa energiavaroja liitetään latausratkaisun kanssa samaan DC-kiskoon, joko DC/DC-suuntaajalla tai ilman suuntaajaa, kun taas toinen ratkaisu on liittää energiavaroja AC-kiskoon suuntaajan kautta. Kuva 11 on yleiskuva DC-kiskoon liitetyistä yhdistetystä latausratkaisusta ja Kuva 12 on yleiskuva AC-kiskoon liitetyistä yhdistetystä ratkaisusta. Nämä kuvat on toteutettu sillä oletuksella, että syöttöä ei tehdä takaisin syöttävään verkkoon. Näistä DC-kiskoon pohjautuva ratkaisu sopii hyvin pikalatausratkaisujen yhteyteen, sillä niissä pitää joka tapauksessa tehdä AC/DC-suuntaus. AC-kiskoon pohjautuva ratkaisu olisi perusteltu peruslatausratkaisujen yhteyteen, sillä AC-kiskosta otetaan syöttö sähköajoneuvoille, jolloin energiavaroja voisi suoraan tukea näitä latureita. Toisaalta AC-kiskoon pohjautuvaan ratkaisuun voitaisiin myös liittää pikalatureita, jolloin pikalataukselle tulevaan AC-kiskoon syötettäisiin energiavaroilta sähköä. [12][43]



Kuva 11. Latausratkaisu yhteisellä DC-kiskolla.

Kuva 12 on yksi mahdollinen ratkaisu siitä, miten AC-kiskoon voidaan liittää energiavara-
rasto ja miten AC-kiskosta otetaan syöttö sähköajoneuvoille. Tässä kuvassa on esitelty
peruslatausratkaisujen ja energiavaranon yhteinen latausratkaisu, mutta kuten edellä
mainittiin, voisi kyseeseen tulla myös pikalatureiden yhdistäminen tähän yhteiseen AC-
kiskoon, josta saadaan syöttö pikalatureille ja tukea energiavara-
rastoilta. [43]



Kuva 12. Latausratkaisu yhteisellä AC-kiskolla.

DC-kiskolla varustetun yhteisen latausratkaisun toteutus on yksinkertaisempaa kuin AC-
kiskolla varustetun latausratkaisun toteuttaminen. Yksinkertaisuus voidaan perustella
sillä, että tarvitaan pienempi määrä AC/DC- ja DC/AC-suuntaajia, kuten lähteessä [44]
mainitaan. Samassa lähteessä DC-kiskolla varustetun ratkaisun etuina on mainittu li-
säksi se, että energiavaranon syöttö kuormille helpottuu, kun suuntaajien määrä vähe-
nee. Toisaalta myös DC-virtaa tuottavien uusiutuvien energian lähteiden yhdistäminen

latausratkaisuun helpottuu. Näistä kahdesta yhdistetystä latausratkaisusta AC-kiskollinen versio on siis monimutkaisempi, hyötysuhteeltaan huonompi sekä hankalampi kontrolloida, sillä siinä on useampia suuntaajia. [44] Lähteessä [12] todetaan AC-ratkaisun olevan kuitenkin suositumpi sen hyvin määriteltujen standardien ansiosta ja koska AC-ratkaisun teknologiaa on enemmän saatavilla. Samalla lähde [12] tuo kuitenkin ilmi myös lähteen [44] mainitsevat DC-ratkaisun edut.

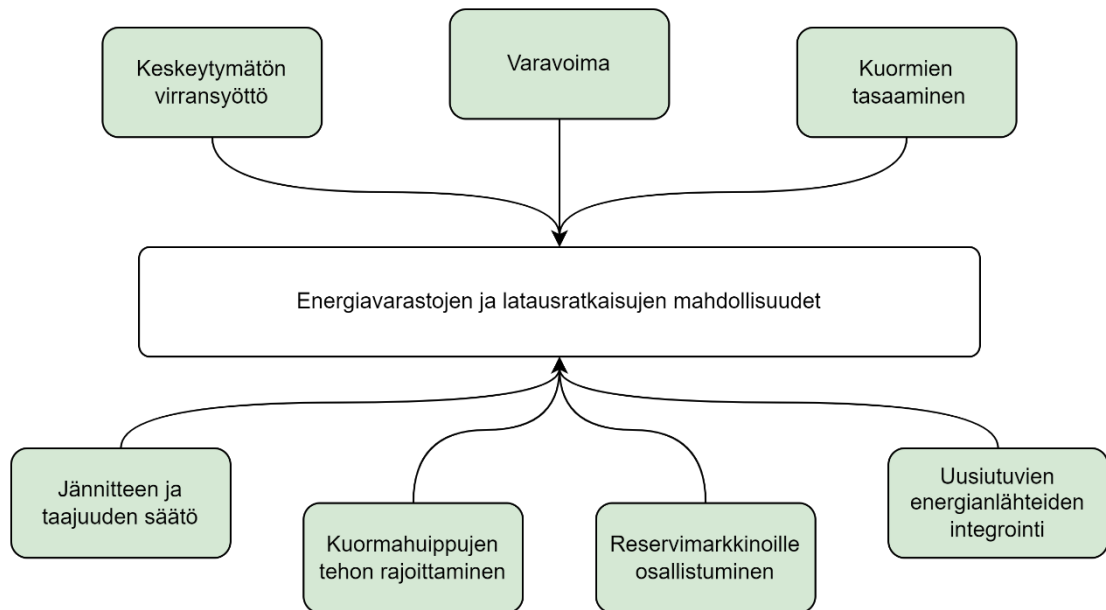
Otetaan esimerkiksi kokonaishyötysuhde lataustapahtumalle, jossa ladataan ensin akusto ja akuston avulla ladataan sähköajoneuvo. Kokonaishyötysuhde tällaiselle lataustapahtumalle on yhteisen AC-kiskon tapauksessa enintään 86 %. Tämä lukema saadaan kertomalla suuntaajien yksittäiset hyötysuhteet yhteen, kun yksittäisen suuntaajan hyötysuhteeksi on oletettu 95 %. Kokonaishyötysuhde akuston kautta on siis ainakin 10 % huonompi kuin suoraan akustoa ladattaessa. Yhteisellä DC-kiskolla varustetun ratkaisun vastaava hyötysuhde asettuu välille 85–95 % riippuen järjestelmässä lopulta tarvittujen suuntaajien määrästä.

5. ENERGIAVARASTOJEN JA SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSRATKAISUJEN INTEGRAATION MAHDOLLISUUDET, HAITAT JA KANNATTAVUUS

Sähköajoneuvojen latausratkaisuja käytiin edellä läpi, ja seuraavaksi pohditaan kirjallisuuskatsauksena energiavaraston ja latausratkaisun integraatiolla saavutettavissa olevia mahdollisuuksia sekä mahdollisia haittoja hyödyntäen myös älykkäisiin verkkoihin kohdistuvia tutkimuksia. Energiavarastoista ja niillä saavutettavista hyödyistä on tehty yleisluontoista tarkastelua lähteissä [13][42][45][47], joiden lisäksi taloudellista analyysiä energiavarastolla saavutettavista hyödyistä on tehty lähteissä [46][48]. Lisäksi lähteessä [49] on analysoitu akuston ikääntymisen vaikutusta kustannuksiin.

5.1 Mahdollisuudet

Energiavarastojen ja latausratkaisujen yhdistelmällä pystytään esimerkiksi tukemaan yhteiseen AC-kiskoon yhdistettyjä kuormia varmistamalla sähkönsyöttö tai varmistamalla sähkönsyötön laatu herkille kuormille. Muita mahdollisia tapoja hyödyntää energiavarastoja on esimerkiksi toteuttamalla kuormahuippujen leikkaus, kuormien tasaaminen pidemmällä aikavälillä, reservimarkkinoille osallistuminen sekä jännitteen ja taajuuden säätöön osallistuminen. [13][42] Näissä lähteissä ei suoranaisesti puhuta latauslaitteiden ja energiavarastojen kombinaatiosta, mutta samoja asioita voidaan hyödyntää siitä huolimatta, sillä toimintaperiaate on sama. Esimerkiksi lähteessä [42] käsitellään ajoneuvojen akuston hyödyntämistä energiavarastona erillisen energiavaraston sijasta (V2G) ja lähteissä [13], [45] ja [47] puhutaan energiavarastojen yleisistä mahdollisuuksista ja käyttökohteista. Kuvaan 13 on listattu eri mahdollisuudet, joita energiavarastojen integraatio latausratkaisuihin luo lähteiden [13][42][45][47] pohjalta.



Kuva 13. Energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation luomat mahdollisuudet.

Energiavarastojen ja latausratkaisujen yhdistämisen perusteet ovat tärkeässä roolissa investointeja tehdessä. Investointien lähtökohtana on, että tehtävä investointi on kannattava ja siitä on hyötyä asiakkaalle ja/tai yritykselle. Seuraavissa alaluvuissa käydään tarkemmin läpi erilaisia käyttökohteita varsinkin akkupohjaisille energiavarastoille ja niillä saavutettavia hyötyjä.

5.1.1 Kuormahuippujen tehon rajoittaminen

Kuormahuippujen leikkauksella tarkoitetaan toimenpidettä, jossa huipputehon maksimiarvoa rajoitetaan esimerkiksi purkamalla energiavarastoa tietyllä teholla. Kuormahuippujen rajauksessa huomioitavia asioita on energiavaraston riittävä koko, jotta energiavarastosta riittää energiaa kuormahuippujen koko kestoksi. Toinen huomioitava asia on energiavaraston riittävän suuri maksimiteho, jonka pitää riittää suurimmissakin kuormahuipuissa ja mieluiten vielä siten, että siinä on mietitty mahdollista kuormituksen kasvua. Lisäksi muita huomioitavia asioita ovat energiavaraston latauksen tilan hallinta, eli milloin energiavarastoa ladataan ja millä kriteereillä, sekä milloin energiavarastoa puretaan. [12][50][51]

Lähteessä [12] energiavaraston ja latausratkaisun yhdistelmällä toteutettiin latausratkaisun verkosta ottaman kuormahuipun leikkaus, eli energiavarastolta syötettiin tehoa jaettuun AC-kiskoon tarkoituksena pienentää verkon syöttämää tehoa määriteltyjen rajojen sisäpuolelle. Toteutuksessa kirjoitettiin logiikka, joka seurasi älykkään mittarin mittaus-tietojen avulla kiskolle tulevaa virtaa ja jännitettä eli periaatteessa tehoa. Jos logiikassa

asetetut rajat ylittyivät, alkoi energiavarasto syöttämään virtaa kokonaisuuden yhteiseen AC-kiskoon. Lisäksi kyseinen logiikka latasi energiavarastoa, kun tarvetta energiavaraston purkamiselle ei ollut. Maksimitehon rajoituksen lisäksi energiavarastoa voitaisiin käyttää myös loistehon kompensoinnissa, jos muut rajoitukset eivät sitä estä. [12][13][42]

Saavutettavia etuja tällaisella ratkaisulla on jakeluverkosta otettavan maksimitehon pieneneminen ja samalla latausratkaisun verkkovaikutuksen pieneneminen. Kuormahuippujen rajoittamista voidaan hyödyntää siis tilanteessa, jossa latausratkaisulta halutaan tietty määrä tehoa, mutta jakeluverkon liityntäpisteestä ei voida ottaa tällaista tehoa. Tällöin verkko syöttää latausratkaisulle rajoitusten mukaisesti virtaa. Loput tarvittavasta tehosta tuotetaan purkamalla energiavarastosta energiaa, jolloin lopputuloksena on latausratkaisu, joka kykenee lataamaan täydellä teholla. Lisäksi kuormahuippujen tehon rajoittamisella voidaan vaikuttaa kustannuksiin. Jakeluverkkoyhtiö on voinut asettaa liittymälle tehotariffin, jossa on asetettuna kiinteät kustannukset laskutusjaksolle, kun tietty teho liittymässä ylittyy. Tällöin tehon kasvaminen johtaa samalla kustannusten kasvuun. Energiavaraston avulla huipputehon rajoittaminen onnistuu, joten tehotariffista aiheutuvat korkeammat verkkopalvelumaksut pystytään välttämään. Toisaalta huipputehon rajoittaminen mahdollistaa sähköliittymän koon optimoinnin, jolloin liittymää ei tarvitse mitoittaa koko järjestelmän huipputehon mukaisesti. [47][50][51][52]

Lähteessä [47] kuormahuippujen tehon rajoittamisen kerrotaan liittyvän läheisesti verkon tasapainon hallintaan jakeluverkon tasolla. Samassa lähteessä tehon rajoittamisen kerrotaan liittyvän myös liittymispisteen mittauksen takaisiin eli Behind-The-Meter (BTM) -toimintoihin, kuten uusiutuvien energianlähteiden tuotannon piikkien tasaamiseen.

Kuormahuippujen tehon rajoittaminen voidaan toteuttaa myös pelkästään ohjelmallisella lataustehon rajoittamisella. Tällöin puhutaan kuormanhallinnasta. Energiavaraston hyödyntäminen osana toimivaa latausjärjestelmää tarvitsee kuitenkin tuekseen kuormanhallintaa, joka tekee energiavaraston ohjaustoimenpiteet purku- ja latausteholle tarpeen mukaan. Kuormanhallinta on kriittinen osa toimivaa latausjärjestelmää, sillä sähköajoneuvojen latauksessa käytettävän virran ja tehon määrä ylittää usein sijoituspaikan alkuperäisten suunnitelmien tekniset rajat. Esimerkkinä kuormanhallinnasta voi nostaa esiin tilanteen, jossa sähköautojen latauspisteelle tulee monta ajoneuvoa samaan aikaan. Jos latauskapasiteettiä latausasemalla ei riitä kaikkien ajoneuvojen lataamiseen täydellä teholla, pudotetaan lataustehoa osassa latureista, jotta jokainen latausasemalla oleva ajoneuvo saa edes osan lataustehosta. Kuormanhallinnan peruseräite on siis rajoittaa latausaseman latausteho sallittuun maksimitehoon ja jakaa saatavilla oleva la-

tauskapasiteetti ladattavien ajoneuvojen välille tasapuolisesti tai vaihtoehtoisesti asema-kohtaisen jakosäännön mukaisesti. Plugitilla käytetään kuormanhallintaa latausjärjestelmissä ja tätä pystytään hyödyntämään integroitaessa energiavarastoa, sillä kuormanhallintaa ei tarvitse tehdä alusta alkaen.

5.1.2 Kuormien tasaaminen

Kuormien tasaaminen eroaa kuormahuippujen leikkauksesta, vaikka niiden toimintatapa on varsin samankaltainen. Ero perustuu pääasiallisesti ajalliseen eroon, eli kuormahuippujen leikkauksessa tasauksen tarve rajoittuu vain korkeimpiin piikkeihin, kun taas kuormien tasaamisessa saatetaan tasata kokonaisen päivän kuormien vaihtelu. Kuormien tasaamisessa energiavaraston koon tarvitsee olla suurempi kuin kuormahuippujen tasaamisessa. Tämä perustuu nimenomaan pidempiaikaisen tasauksen tarpeeseen. Oikean tehon ja energiavaraston lataus- ja purkusyklarit suunnittelu pitää myös toteuttaa huomioiden kuormien tasaamisen pidempi aikaväli. [13]

Kuormien tasaamisella pyritään pienentämään kustannuksia, joita syntyy sähkön korkean kysynnän aiheuttamasta sähkön hinnan noususta. Periaatteessa energiavarastoa siis ladataan, kun sähkön hinta ja kysyntä ovat alhaiset ja puretaan, kun kysyntä ja hinta nousevat. Näin toimimalla saadaan säästöä energiakustannuksista, sillä korkean kysynnän aikana ostettavan sähkön määrä minimoidaan ja pystytään hyödyntämään halvempaa sähköä kulutuksessa. [42][47][51]

Kuormien tasaamisella voidaan siis siirtää kulutuksen ajankohtaa verkon suhteen. Näin säästetään sähkön hinnassa sekä mahdollisissa muissa kysynnän mukaan määräytyvistä maksuissa.

5.1.3 Reservimarkkinoille osallistuminen

Reservimarkkinoiden avulla ylläpidetään sähkövoimajärjestelmän tasapainotilaa. Tasapainotilan ylläpitäminen vaatii tehotasapainon ylläpitämisen jokaisena hetkenä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että sähköverkon tehon kulutus ja tuotanto pitää olla jokaisena hetkenä yhtä suurta. Energiavarastojen avulla voidaan osallistua reservimarkkinoille purkamalla ja lataamalla energiavarastoa. Reservimarkkinoilla säädetään pääasiassa verkon taajuutta pätötehon avulla. Energiavarastosta pätötehoa purkamalla voidaan nostaa verkon taajuutta, kun taajuus on liian alhainen. Toisaalta varastoimalla pätötehoa energiavarastoon taajuuden ollessa korkea, voidaan verkon taajuutta laskea. [13][47]

Kun halutaan käyttää energiavarastoa reservimarkkinoille osallistumisessa, tarvitsee energiavaraston koon olla riittävän suuri. Latausratkaisujen yhteydessä ei välttämättä ole mahdollisuutta tai edes järkevää toteuttaa näin suurta energiavarastoa. Reservimarkkinoille osallistuessa verkon haltija ja energiavaraston omistaja tekevät sopimuksen, jossa tietty määrä energiaa on oltava syötettävissä verkkoon tarvittaessa. Samalla energiavaraston omistaja saa tuloja sopimuksen mukaisesti. [13][42][47]

5.1.4 Jännitteen ja taajuuden säätö

Jännitteen ja taajuuden säädöllä voidaan viitata joko reservimarkkinoihin tai sitten saarekekäytössä olevan sähköverkon tasapainotilan ylläpitämiseen. Edellisessä luvussa käsiteltiin reservimarkkinoille osallistumista energiavaraston avulla. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin mitä jännitteen ja taajuuden säädöllä tarkoitetaan ja käydään lisäksi läpi saarekekäytön näkökulmaa.

Verkon stabiilisuuden kannalta jännitteen ja taajuuden säätö ovat kriittisiä toimintoja niin valtakunnallisesti kuin myös paikallisessa saarekkeessa. Koko sähkövoimajärjestelmä perustuu tietyn taajuuden pohjalle, ja jännitetasot määrittävät verkon komponenttien suunnitellun toiminta-alueen. Jännitetasojen vaihtelu voi aiheuttaa verkon komponenttien vikaantumisen tai viallisen toiminnan. Jännitteen ja taajuuden on siis pysyttävä aseteltujen rajojen sisäpuolella jatkuvasti. [13][47]

Energiavarastojen ja soveltuvan tehoelektroniikan avulla voidaan säätää jännitettä ja taajuutta. Jännitteen säätö toteutetaan loistehon avulla. Tuottamalla loistehoa energiavaraston tehoelektroniikan avulla verkon jännitettä voidaan nostaa ja käyttämällä loistehoa tehoelektroniikan avulla voidaan alentaa verkon jännitetasoa. Taajuuden säätö taas toteutetaan pätötehon avulla. Energiavarastosta pätötehoa purkamalla voidaan nostaa verkon taajuutta, kun taajuus on liian alhainen ja varastoimalla pätötehoa energiavarastoon taajuuden ollessa korkea, voidaan verkon taajuutta laskea. [13][47]

Jännitteen ja taajuuden säätö ovat palveluita, joita tarvitaan joko saarekekäytössä tai sähköverkon hallinnassa. Kun taajuuden säätöä hyödynnetään sähköverkon yhteydessä, voidaan siitä saada tuloja. Taajuuden säädöstä on tehty erinäisiä tuotteita, jotka ovat suunniteltu eri käyttötarpeisiin. Näistä tuotteista Suomessa vastaa Fingrid Oyj ja niiden tarkoituksena on varmistaa sähkönsiirron luotettavuus kaikissa tilanteissa. [53]

5.1.5 Keskeytymätön virransyöttö

Uninterruptible Power Supply (UPS) eli keskeytymätön virransyöttö on järjestelmä, jonka tarkoituksena on pitää nimensä mukaisesti sähköjärjestelmässä keskeytymätön virransyöttö vikatilanteiden ja muiden sähköjakelun katkojen takia. UPS-järjestelmä luo eräänlaisen saarekekäytön, kun sähköverkossa tapahtuu katko. Tällöin UPS-järjestelmän takana oleva verkko ei huomaa mitään eroa tilanteeseen ennen katkosta ja katkoksen jälkeen. UPS-järjestelmiä käytetään tilanteissa, joissa sähkönsyötön on oltava luotettavaa ja/tai järjestelmä syöttää herkkää kuormaa. Etenkin akkupohjaiset energiavarastot ovat tähän tarkoitukseen sopivia niiden hyvän reaktionopeuden ansiosta. [13][47]

Logistiikan ja julkisen liikenteen yhteydessä autojen jatkuva ja aikataulun mukainen liikkuvuus on tärkeää. Koska ajoneuvokanta on muuttumassa sähköisempään suuntaan myös logistiikan ja julkisen liikenteen osalta, latausratkaisujen toimitusvarmuus on oltava korkea. Esimerkiksi sähkölinja-autojen varaustila pitää olla riittävä, jotta aikataulut pitävät ja vuorot pystytään ajamaan. Samalla tapaa logistiikassa sähkökuorma-autojen varauksen pitää olla riittävä, jotta sovitut kuormat pystytään kuljettamaan aikataulussa. Energiavarastolla voidaan varmistaa syöttö niin häiriötilanteissa, kuin myös usean ajoneuvon latauksen yhteydessä, jolloin ajoneuvoja voidaan ladata suuremmalla yhteisteholla. Näin saavutetaan lyhyempi varikkopysähdys. [54]

5.1.6 Uusiutuvien energianlähteiden integrointi

Uusiutuvien energianlähteiden tuotannon vaihtelevuus aiheuttaa suuria tehonvaihteluja sähköjärjestelmän liittymispisteessä. Tätä tehonvaihtelua voidaan pienentää hyödyntämällä energiavaraston kykyä varastoida ja purkaa energiaa. Tällöin energiavarastolle voidaan antaa tietty rajoitus tehonvaihtelulle ja energiavarastoa puretaan tai ladataan tietyllä teholla, jotta verkon kokema tehonvaihtelu ei ylitä tätä asetettua arvoa. Samaa periaatetta voidaan hyödyntää, jos vaikka jokin kuormitus aiheuttaa nopean muutoksen. [13][47]

Ajoneuvojen lataus suoraan uusiutuvalla energialla ei välttämättä ole mahdollista sen vaihtelevuuden takia. Tällöin energiavarastoa voidaan ladata vaihtelevalla uusiutuvalla energialla pidemmällä ajanjaksolla ja ladata sähköajoneuvoa tasaisella teholla myöhemmin.

Lisäksi uusiutuvien energianlähteiden integrointi mahdollistaa vihreän energian käytön laajentamisen ja omavaraisuuden parantamisen. Tällä voi olla positiivinen vaikutus yrityksen imagoon ja siirtyminen vihreämpään energiaan ja sen hyödyntämiseen voi olla

jopa edellytyksenä sopimuksia solmittaessa. Näin ollen energiavaraston toteuttaminen voi mahdollistaa paremman aseman markkinoilla.

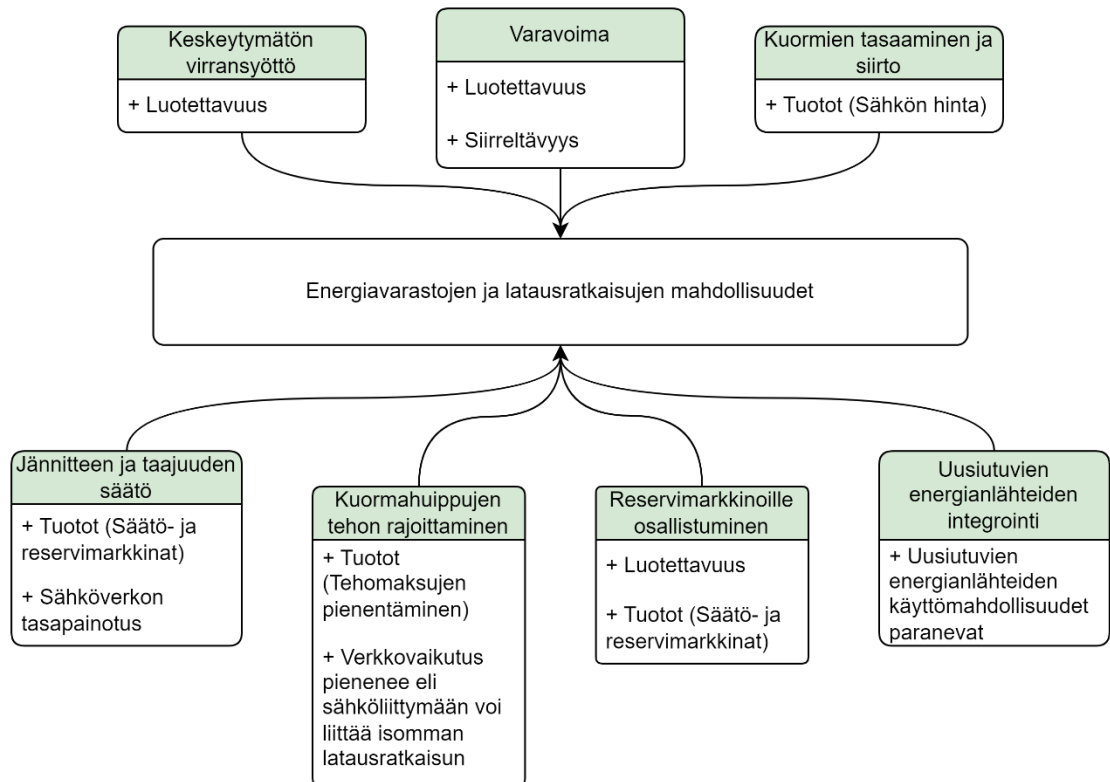
5.1.7 Varavoima

Energiavaraston lähtökohtana on energian varastointi myöhempää käyttöä varten. Loogisesti yksi oleellisista käyttökohteista on energiavaraston käyttäminen varavoimana, esimerkiksi paikassa, johon ei tule sähköliittymää, sähköliittymä on alimitoitettu tai sähkön syöttöön tulee pidempi keskeytys. Tällaisia paikkoja voivat olla rakennustyömaat, festivaalit tai muut tapahtumat. [47]

Kappaleessa 5.1.5 logistiikan ja julkisen liikenteen jatkuva ja aikataulun mukainen liikkuvuus ja sen varmistaminen onnistuu myös varavoiman avulla. Ainoana erona on, että varavoima kytkeytyy vasta sähkökatkon jälkeen, jolloin sähkönsyöttö palautuu katkon kautta.

5.1.8 Yhteenveto

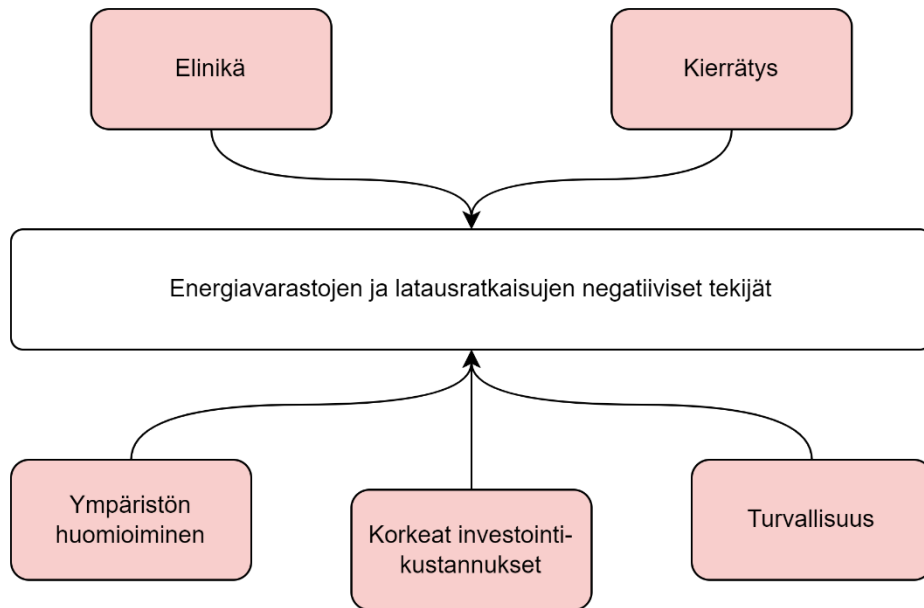
Edellä käytiin läpi erilaisia mahdollisuuksia, joita energiavarastot luovat ja mitä etuja niillä voidaan saavuttaa. Energiavarastot luovat mahdollisuuksia saada tuottoa muutamalla eri tavalla, kuten kuormien tasaamisella, jännitteen ja taajuuden säädöllä sekä tehohuipujen rajaamisella. Pikalataus tarvitsee korkeaa tehoa, ja jos useampaa latausratkaisua käytetään samaan aikaan, nousevat tehojen määrät entisestään. Energiavaraston avulla verkkovaikutusta eli verkosta otettavaa tehoa voidaan pienentää purkamalla energiavarastoa. Energiavarastoja voidaan myös hyödyntää heikkojen sähköliittymien tukemisessa, jolloin heikkoon sähköliittymään voidaan liittää tehokkaampi latausratkaisu. Lisäksi niitä voidaan käyttää luotettavuuden kasvattamiseen, sillä energiavarastot soveltuvat hyvin varavoimaksi tai UPS-käyttöön. Oheisessa kuvassa 14 on listattuna eri mahdollisuuksien tuomat edut. [13][47][51][52]



Kuva 14. Yhteenveto saavutettavista hyödyistä eri mahdollisuuksilla.

5.2 Haitat

Energiavarojen lisääminen latausratkaisujen yhteyteen tuo mukanaan myös negatiivisia tekijöitä, jotka pitää ottaa kriittiseen tarkasteluun tehtäessä päätöksiä. Näitä tekijöitä esitellään kuvassa 15, jotka on löydetty lähteistä [13], [25], [42], [45] ja [47]. Näihin tekijöihin lukeutuvat ympäristö, korkeat investointikustannukset, akuston elinikä, kierrätykseen liittyvät tekijät sekä turvallisuus.



Kuva 15. Energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation negatiiviset tekijät.

Ympäristöön ja kierrätykseen liittyvät haitat pohjautuvat akuissa käytettyihin materiaaleihin. Akkupohjaisten energiavarastojen kierrätys litiumioniakkujen tapauksessa ei vielä ole tarpeeksi hyvällä tasolla lähteen [13] mukaan ja koska akuissa käytetyt materiaalit voivat olla myrkyllisiä, tarvitsee niiden elinkaaren lopussa ottaa tämä huomioon. Kierrätyksen kehittämiseen on kuitenkin panostettu viime aikoina [13], joten tulevaisuudessa tämä voi muuttua positiiviseksi asiaksi kiertotalouden kautta. Ympäristöön liittyviä haittavaikutuksia voi ilmetä myös onnettomuustilanteissa, joissa akusto syttyy tuleen. Akkupalossa voi vapautua myrkyllistä savua ja sammutusveden mukana ympäristöön voi päästä myrkyllisiä aineita, aiheuttaen ympäristöön kohdistuvia haittavaikutuksia. [13][45][47]

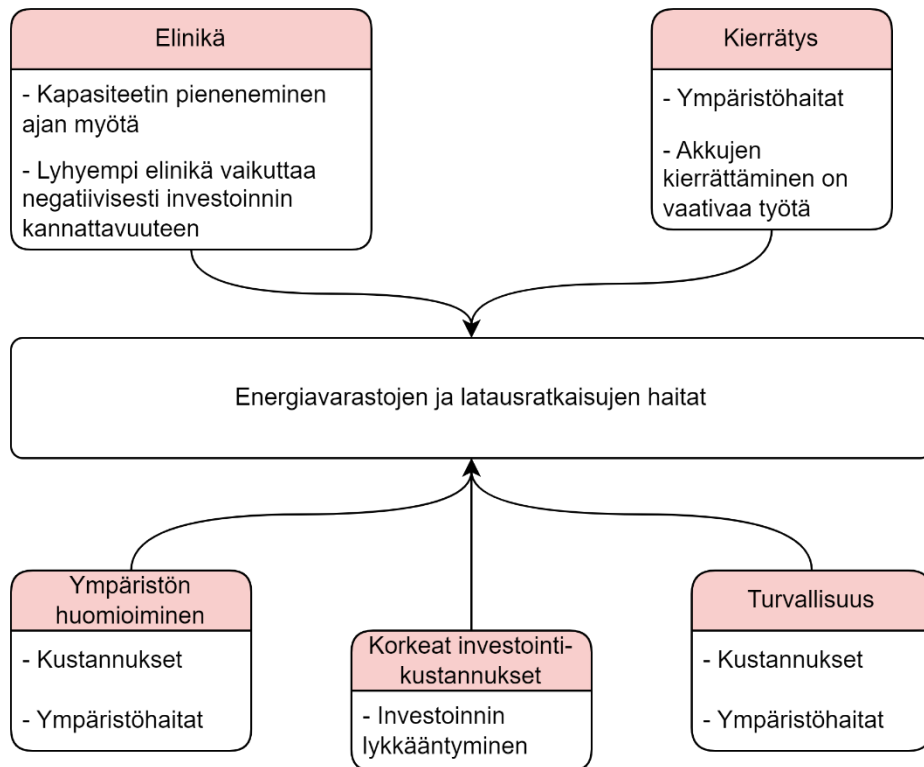
Akkupohjaisten energiavarastojen kestävyys on myös huomioitava asia. Akkujen kestävyys määrittelee energiavaraston eliniän ja ikääntymiseen liittyvän kapasiteetin pienenevän. Kestävyys on tärkeä osa investointipäätöstä, sillä se määrittää energianvaraston hyödyntämiseen käytettävissä olevan kapasiteetin ja investoinnin pitoajan. Yleisesti ottaen pitkäkestoinen investointi on parempi kuin lyhyt, ja mitä pidempään energiavaraston kapasiteetti pysyy korkeana sitä parempi. [47]

Turvallisuus liittyy omaisuuden ja ympäristön suojeluun. Akkupohjaista energiavarastoa suunniteltaessa on järkevää tutustua eri akkuvaihtoehtoihin ja niiden turvallisuuteen. Huono turvallisuus ja siitä johtuvat mahdolliset tulipalot voivat aiheuttaa suuret kustannukset menetettyinä resursseina. [42][47]

Lisäksi on huomioitava investointikustannukset. Investointikustannukset on tässä luettu haitaksi, sillä korkeat investointikustannukset voivat viivästyttää investointia lähteen [47]

mukaan. Toisaalta samassa lähteessä mainitaan syyksi se, että ansaintamahdollisuuksia ei välttämättä ole saatavilla. Tässä työssä yritetään selvittää juuri näitä asioita. Kustannuksia ja investoinnin kannattavuutta käydään läpi tarkemmin seuraavassa alaluvussa 5.3.

Kuva 16 on alaluvun 5.2. yhteenveto. Kyseiseen kuvaan on koottu energiavarastojen ja latausratkaisujen integraatioon liittyvät negatiiviset tekijät ja niiden aiheuttamat haitat.



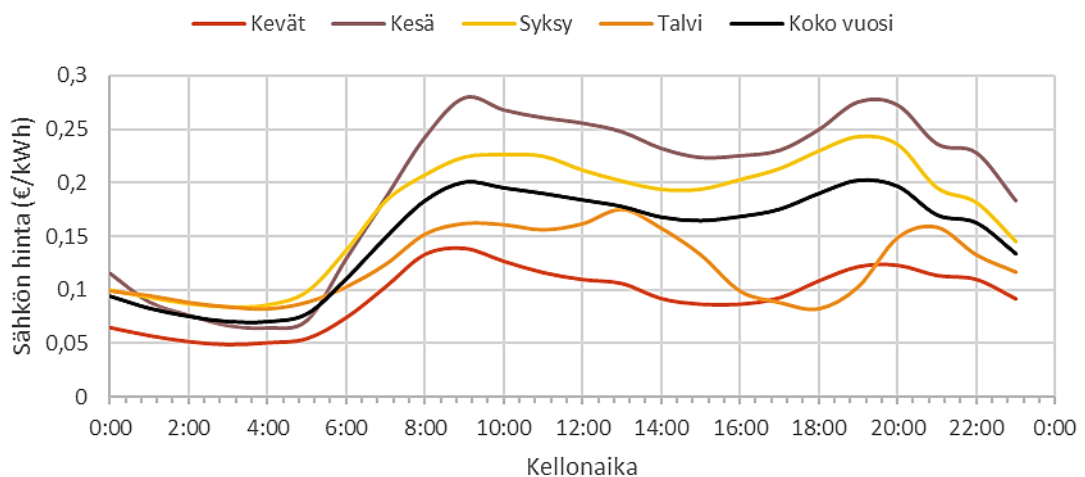
Kuva 16. Yhteenveto energiavarastojen ja latausratkaisujen haitoista.

5.3 Kannattavuus

Luvussa 5.1 käytiin läpi eri mahdollisuuksia, joita energiavarastot luovat. Mahdollisuudet, joilla saadaan tuloa, olivat kuormahuippujen tehon rajoittaminen, kuormien tasaus ja siirto, reservimarkkinoille osallistuminen sekä jännitteen ja taajuuden säätö. Lisäksi kustannusten pienentämiseen liittyen lähteessä [47] mainitaan verkkoinvestointien lykkäys ja verkon maksimitehon kasvattamisen lykkäys. Suoria kustannuksia on saman lähteen mukaan korkeat investointikustannukset. Tuottoa voidaan myös miettiä kannalta, jossa sähkön syötön keskeytys aiheuttaa kustannuksia. Tällaiset kustannukset voidaan välttää energiavarastolla, joka voidaan tulkita tuotoksi.

Kuormien tasauksella ja siirrolla saadaan suoraan tuottoa sähkön hinnan kautta. Lataamalla energiavarastoa halvalla sähkön hinnalla ja purkamalla kalliin sähkön hinnan aikaan saadaan tuottoa ja samalla tasataan kuormitusta. [47] Oheisessa kuvassa 17 on esitetty tuntikohtaisen sähkön pörssihinnan keskihinta eri vuodenaajoilta. Data on aikaväliltä 18.4.2022-18.4.2023. Data pohjautuu Nord Poolin määrittelemään sähkön markkinahintaan (Alv. 0 %) ja data on ladattu lähteestä [55]. Vuoden ajalta sähkön minimihinta ilman arvonlisäveroa on ollut -0,0021 €/kWh ja maksimihinta on ollut 0,8611 €/kWh. Kuvan pohjalta on havaittavissa sähkön hinnan olevan halpaa yöllä, ja kalliimpaa päivällä. Lisäksi eri vuodenaikojen välinen ero on selkeästi havainnoitavissa sähkön hinnasta. Huomioitavaa on myös se, että kyseisessä datassa on havainnoitavissa Ukrainan ja Venäjän välisen sodan kärjistämä energiakriisi, jonka takia sähkön hinta oli vuonna 2022 mittaushistorian kallein [56][57]. Tämä huomataan esimerkiksi siitä, että talvella sähkö oli halvempaa kuin kesällä. Talven hintoihin vaikuttivat tukitoimet, joita ruvettiin tekemään energiakriisin helpottamiseksi.

Lähteen [47] maininta verkon maksimitehon kasvattamisen lykkäyksestä pohjautuu energiavarastolta purettavissa olevaan tehoon. Energiavarastolta purettavalla teholla voidaan rajoittaa liittymään kohdistuvaa tehoa, jolloin liittymän mitoitus ei tarvitse kasvattaa. Liittymän mitoituksella tarkoitetaan tässä yhteydessä komponenttien kapasiteetin korottamista, rinnakkaisen sähköverkkoliittymän rakentamista tai alkuperäisen sähköverkkoliittymän korvaamista isommalla. Näihin liittyvät kustannukset voidaan silloin laskea saavutettaviksi säästöiksi.



Kuva 17. Sähkön tuntikohtainen keskihinta eri vuodenaikoina. [55]

Kuormahuippujen tehon rajoittamisesta on mahdollista saada säästöjä, jos liittymälle on määritelty tehotariffimaksuja. Tässä on otettu esimerkiksi Tampereen alueen tehotariffimaksut. Tampereen Sähköverkon alueella 400 V -liittymän pätötehomaksu on ilman

arvonlisäveroa 2,08 €/kW/kk ja se pohjautuu 12 kk liukuvan keskiarvon kahden suurimman tuntitehon keskiarvoon. Loistehomaksu taas on 1,25 €/kVAr/kk ja se on kuukauden suurimman induktiivisen loistehon mukaan määräytyvä, mutta siitä vähennetään 20 % tai vähintään 50 kVAr. Kun kyseessä on 20 kV -liittymä, riippuu päto- ja loistehomaksun suuruus kulutetun sähkön määrästä vuositasolla. Yli 10 000 MWh/a kulutuksella maksut ovat 2,76 €/kW/kk ja 1,25 €/kVAr/kk sekä vastaavasti alle 10 000 MWh/a kulutuksella 1,48 €/kW/kk ja 1,25 €/kVAr/kk. Kapasitiivinen loisteho ei ole laskutettavaa Tampereen Sähköverkon alueella. Jos arvonlisävero halutaan ottaa laskuihin mukaan, on se 24 %. [58]

Reservimarkkinoille osallistuminen ja jännitteen sekä taajuuden säätö ovat hyvin samantyyppiset toimintaperiaatteeltaan. Näissä saavutettavat tuotot liittyvät säätö- ja reservimarkkinoille tehtyihin sopimuksiin, joissa myydään tietyn tehon tai kapasiteetin mukaisesti sähköverkkoon syötettävää tehoa tai kulutuksen vähentämistä tai lisäystä. Tuottojen määrää arvioitaessa on punnittava järjestelmän ominaisuuksia ja mahdollisia haittoja, kun energiavarastoa hyödynnetään säätö- ja reservimarkkinoilla. [53]

Energiavarastolla voidaan saavuttaa tuloja myös tilanteessa, jossa sähkön syötön keskeytyksestä aiheutuu kustannuksia. Tällaisen arviointi on kuitenkin vaikeaa, ja mahdollisen järjestelmän hankkijan on itse osattava arvioida haitan suuruus ja tästä aiheutuvat kustannukset. Energiavarasto toimii tässä tilanteessa varavoimana ja torjuu kustannuksia, jotka aiheutuvat keskeytyksistä.

Investointikustannukset sisältävät akuston ja tarvittavat tehoelektroniikan komponentit. Aikaisemmin luvussa 3.3 todettiin litiumioniakkujen olevan hyvä vaihtoehto, joten arvioidaan investointikustannuksia niiden pohjalta. Litiumioniakkujen hinnaksi on saatu taulukossa 9 energianmäärän pohjalta 500–2100 €/kWh ja tehon pohjalta 1000–3400 €/kW. Investointikustannus on siis hyvin korkea. Suurteholaturin teho on tyypillisesti 50–180 kW. Jos käytössä on useampi latausasema tai kyseessä on latauskeskus, nousee teho tästä entisestään. Henkilöautojen akkujen koot liikkuvat välillä 4–90 kWh ja hyötyajoneuvojen akkujen koot liikkuvat välillä 11–400 kWh lähteen [42] mukaan. Näiden lukujen ja latausmäärien pohjalta voidaan päätellä suuntaa antava koko energiavarastolle. Lisäksi energiavaraston kokoon vaikuttaa haluttu käyttötarkoitus ja tulon ansaintamenetelmien valinta. Jos akkuenergiavarasto suunniteltaisiin 200 kWh kokoiseksi, tulisi akustolle hintaa 100 000 €, kun kustannuksena käytetään 500 €/kWh. Suurteholaturin hinta on noin 40 000–80 000 €, kun kyseessä on 100–300 kW tehoinen latausratkaisu [44][59]. Akuston kustannus latausratkaisun yhteydessä merkitsee siis huomattavaa osuutta kokonaisinvestoinnista.

Ilman kaksisuuntaista tehoelektroniikkaa latausratkaisun ja energiavaraston yhdistelmää ei voida purkaa verkon suuntaan. Tällöin energiavarastoa voidaan ladata kapasiteetin puitteissa ja purkaa lataustapahtuman tai muun kuormituksen yhteydessä. Tämä rajoittaa soveltuvat ansaintatavat kuormien huipputehon rajoittamiseen, kuormien tasaamiseen sekä säätö- ja reservimarkkinoiden tilanteisiin, joissa kuorman pudottaminen tai kuorman lisääminen ovat mahdollisia. Kuorman pudottaminen ja lisääminen voidaan toteuttaa hyödyntämällä energiavaraston lataamista ja purkamista.

5.3.1 Kiinteä hintaraja

Tarkastellaan esimerkkinä tilannetta, jossa asiakkaalle toteutetaan 180 kW latausjärjestelmä, jonka hinta on 60 000,00 €. Tähän kylkeen liitetään 188 kWh akusto, jonka hinnan oletetaan olevan 100 000,00 €. Ajanjaksoksi on valittu 10 vuotta, joka on realistinen akun ominaisuuksien pohjalta. 10 vuoden ajanjaksoa on käytetty myös aikaisemmin aiheesta tehtyjen tutkimusten [60][61] laskelmissa.

Otetaan huomioon kuormien tasaamisesta ja siirrosta saatu tuotto sähkön hinnan kautta. Saatavissa oleva hyöty riippuu kuormituksesta ja sen ajoituksesta normaalissa käytössä. Lisäksi rajoitteita tuo mukanaan kuorman siirreltävyydelle asetetut rajoitteet. Esimerkiksi sähkölinja-autojen latauskentällä lataus tapahtuu todennäköisesti yön yli, jolloin sähkön hinta on jo valmiiksi halpaa, kuten kuvasta 17 voidaan havaita. Kuormien tasaaminen ja tehohuippujen leikkaus sekä säätö- ja reservimarkkinoille osallistuminen yhdessä luovat hyvät edellytykset tuottoisalle investoinnille lähteen [62] tutkimusten perusteella.

Investoinnin taloudellisuutta tutkittaessa pitää investoinnin tulevat tuotot diskontata nykyhetkeen. Diskonttaus voidaan tehdä joko huomioimalla korkoa korolle -ilmiö tai jättämällä ne huomioimatta. Diskonttauksen kaavana käytetään tässä esimerkissä kaavaa

$$K_0 = K_n \cdot \frac{1}{(1+i)^n}, \quad (1)$$

jossa K_0 on nykyhetkeen diskontattu nettotuotto, K_n on nettotuotto vuonna n , i on korkoprosentti ja n on vuosi. Investoinnin nettonykyarvo on nykyhetkeen diskontattujen nettotuottojen summa, josta vähennetään investoinnin määrä. [63]

Esimerkin investoinnin määrä oli 100 000 €. Jotta tällainen investointi maksaisi itsensä takaisin 5 % korolla 10 vuodessa, tarvitsee vuosittaisen säästön olla noin 12 950 €. Tähän tulokseen päästään ratkaisemalla yllä olevasta kaavasta (1) K_n . Taulukossa 10 on esiteltynä muutamia eri investoinnin kustannuksia, ja näillä investoinneilla tarvittavien vuosittaisten säästöjen suuruus 10 vuoden pitoajalla.

Taulukko 10. Eri investointeja ja tarvittava säästö vuodessa 5 % korkokannalla.

Investoinnin määrä (€)	Pitoaika (a)	Säästö vuodessa (€)
50 000	10	6 475
100 000	10	12 950
200 000	10	25 900
400 000	10	51 800

Tuoton arviointia varten toteutettiin MATLAB-laskentaohjelmisto, johon tuotiin lähteestä [55] sähkön hintadata, sekä annettiin lähtötiedoiksi akuston koko, lataus- ja purkuteho sekä latausratkaisun kuormitusmalli. Akustolle määriteltiin SoC-rajat, joiden sisällä akun varaustason halutaan pysyvän akuston eliniän parantamiseksi. Lataustapahtuman hyötysuhteeksi arvioitiin 90 %. Algoritmin toiminta pohjautuu hintarajaan. Hintarajalla tarkoitetaan hintaa, joka määrittelee energiavaraston latauksen tapahtumisen. Hintarajalle saattaa olla tarpeellista määritellä hystereesi, jotta vältetään turhilta nopeilta muutoksilta. Kun sähkön hinta on alle hintarajan, ladataan akustoa ja kun hinta ylittää hintarajan, puretaan akustoa. Hintarajan muutoksella on iso vaikutus saavutettaviin tuottoihin. Algoritmin toiminta voidaan kuvata seuraavien yhtälöiden avulla,

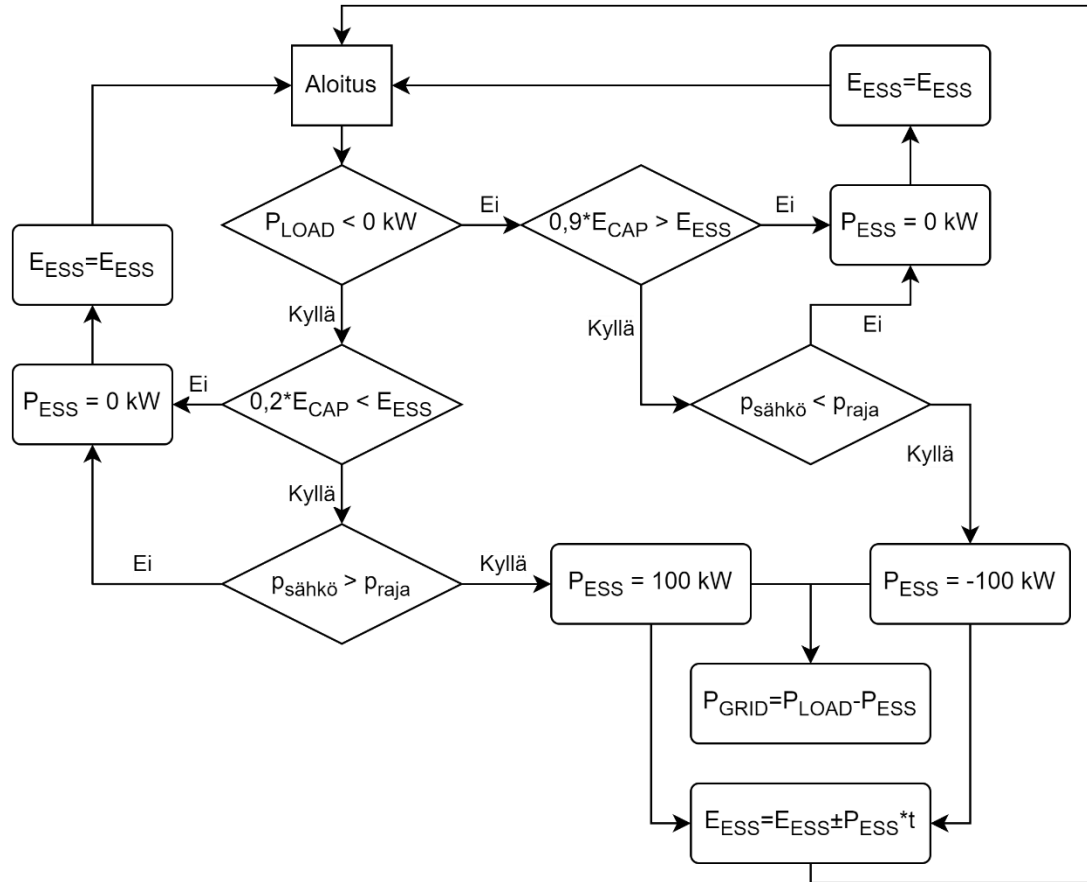
$$P_{\text{ESS}} = \begin{cases} 100 \text{ kW}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} < E_{\text{ESS}} \text{ ja } p_{\text{sähkö}} > p_{\text{raja}} \\ -100 \text{ kW}, & 0,9 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } p_{\text{sähkö}} < p_{\text{raja}} \\ 0 \text{ kW}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} \geq E_{\text{ESS}} \geq 0,9 \cdot E_{\text{cap}} \end{cases} \quad (2)$$

$$E_{\text{ESS}} = \begin{cases} E_{\text{ESS}} - P_{\text{ESS}} \cdot t, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} < E_{\text{ESS}} \text{ ja } p_{\text{sähkö}} > p_{\text{raja}} \\ E_{\text{ESS}} + P_{\text{ESS}} \cdot t, & 0,9 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } p_{\text{sähkö}} < p_{\text{raja}} \\ E_{\text{ESS}}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} \geq E_{\text{ESS}} \geq 0,9 \cdot E_{\text{cap}} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{\text{GRID}} = P_{\text{LOAD}} + P_{\text{ESS}} \quad (4)$$

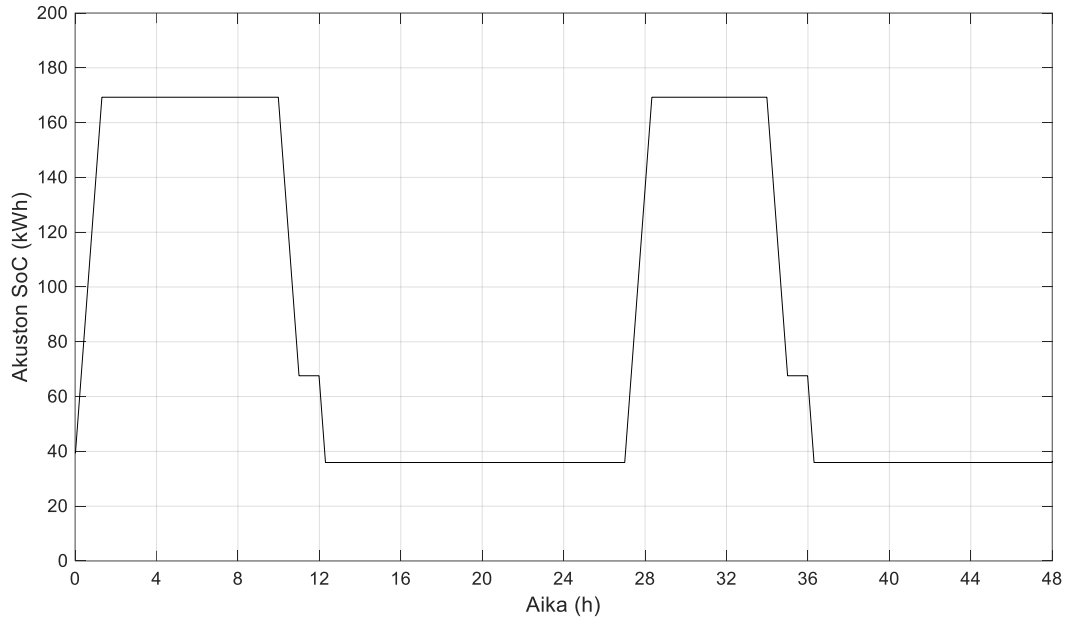
Kaavoissa muuttuja P_{ESS} on energiavaraston teho, muuttujat $p_{\text{sähkö}}$ ja p_{raja} ovat sähkön hinta ja sähkön rajahinta, muuttuja E_{ESS} on energiavarastoon varastoidun energian määrä, muuttuja E_{cap} kuvaa energiavaraston kapasiteettia, muuttujat P_{GRID} ja P_{LOAD} ovat verkosta otettu teho sekä kuorman ottama teho ja muuttuja t on aika. Kaava (2) määrittää energiavaraston purku- tai lataustehon yhtälöryhmän kriteerien mukaisesti. Kaavan (3) avulla voidaan laskea energiavarastoon varastoitunut energiamäärä yhtälöryhmän kriteerien mukaisesti. Kaavassa (3) on syytä kiinnittää huomiota aikaan, ja tarvittaessa jakaa teho sopivalla kertoimella. Jos laskentaa suoritetaan minuuttitasolla, tarvitsee teho jakaa arvolla 60. Näin yhtälöryhmä pitää paikkaansa ja saatu energiamäärä on kWh. Kaava (4) kertoo verkosta otetun tehon ja siitä on mahdollista selvittää kuorman ottama teho kussakin tilanteessa. Toiminnan havainnollistamiseksi kaavat on lisäksi muunnettu logiikkakaavioksi. Kuva 18 esittää tätä logiikkakaaviota. Lisäksi tämän työn

lopussa on liitteenä A esitetty tämän logiikkakaavion mukainen MATLAB-laskentaohjel-
misto.



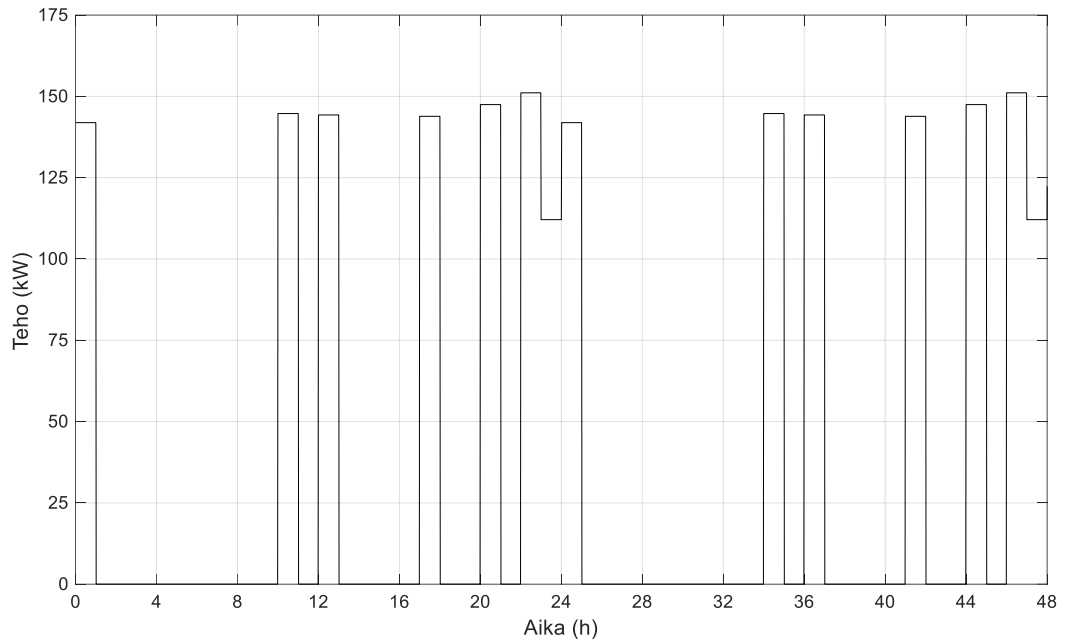
Kuva 18. Ohjausalgoritmin logiikka, kun käytetään hintarajaa.

Kuva 19 kuvaa akustoon varastoitua energiaa eli sen SoC-tilaa 48 h tarkastelujaksolla. Esimerkissä akustolle asetettiin SoC-rajaksi 20–90 % kokonaiskapasiteetista, joka voidaan kyseisestä kuvasta huomata, sillä akuston kapasiteetti ei ole missään kohtaa täynnä, eikä myöskään täysin tyhjä. Kuvasta voidaan myös havainnoida akuston lataus- ja purkusykliä sekä ne ajanhetket, jolloin akku on ollut käyttämättömänä. Hyödyntämällä MATLAB-laskentaohjelmaa, voidaan laskea huippukohtien lukumäärät kokonaiselle vuodelle, joita on noin 260. Tämä tarkoittaa, että vuoden aikana akustoon on kohdistunut 257 lataus- ja purkusykliä. Ekstrapoloimalla syklien lukumäärä 10 vuoden ajanjaksolle akkuenergiavaraston lataus- ja purkusyklien määräksi tulisi siis noin 2570 sykliä. Luku on linjassa Li-ion-akun eliniälle taulukossa 9 ilmoitetun 100–10 000 syklilukumäärän kanssa.



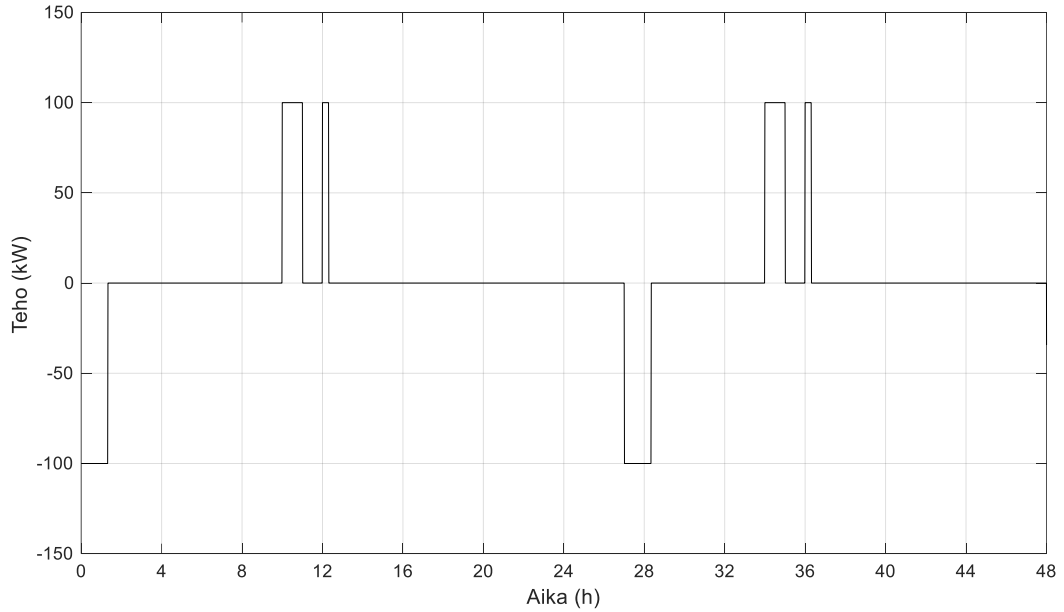
Kuva 19. Akustoon varastoitu energiamäärä 48 h ajanjaksolla.

Kuva 20 esittää esimerkin kuorman lataustehon 48 h ajanjaksolla. Laskentaa varten kyseinen kuormaprofiili on jatkettu vuoden pituiselle ajanjaksolle. Kuormaprofiili pohjautuu yrityksen käytössä olevaan latausdataan latausasemalta, joka vastaa lähtötiedoissa annettua laturia. Vuoden pituisen ajanjakson kuvaajaa ei kuitenkaan esitetä tässä, sillä kyseisestä kuvaajasta ei pysty erottamaan lataustapahtumia. Tällainen kuormitusprofiili ei vastaa täysin todellista kuormitusta, sillä kuormituksessa tapahtuu muutoksia lataustapahtuman edetessä. Kuormitusprofiiliin liittyy epävarmuutta myös sen takia, että kuormitukset eivät yleensä tapahdu ennalta määriteltynä aikoina. Tähän muodostaa poikkeuksen varauksiin perustuvat latausasemat, joissa lataustapahtumien alkamista pystytään ennustamaan etukäteen varauksien pohjalta. [40]



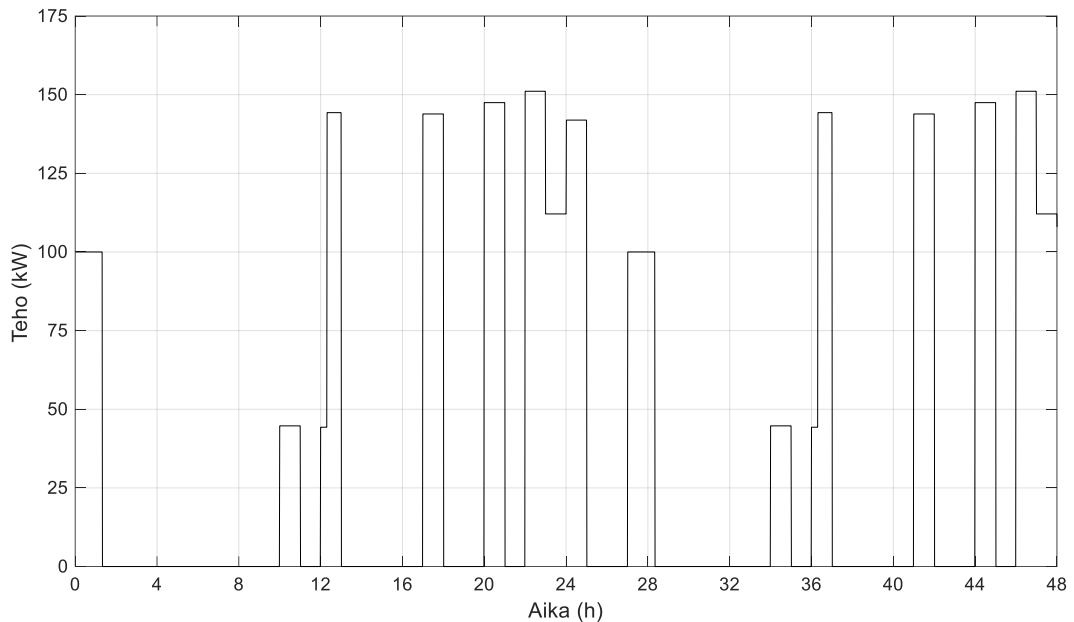
Kuva 20. Kuorman lataustehon vaihtelu 48 h aikana.

Kuva 21 esittää akuston lataus- ja purkutehoja 48 h ajanjaksolla. Kuvaajassa negatiivinen teho tarkoittaa akuston lataamista, kun taas positiivinen teho tarkoittaa akuston purkamista. Lisäksi on havaittavissa, että lataus- ja purkuteho eivät ylitä ± 100 kW. Tämä perustuu algoritmiin, jolla akustoa ohjataan. Algoritmi on määritelty lataamaan ja purkamaan asetetulla maksimiteholla aina kun mahdollista.



Kuva 21. Akuston lataus- ja purkutehot 48 h ajanjaksolla.

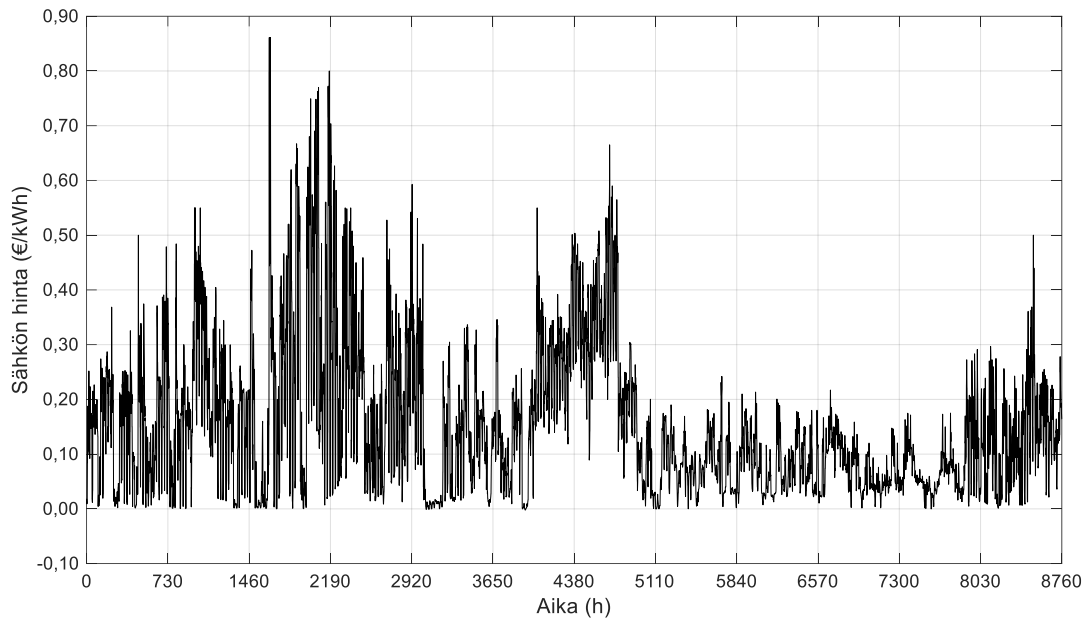
Yhdistämällä kuorman lataustehon ja akuston purku- ja latausteho saadaan muodostettua Kuva 22. Kuva 22 esittää siis sähköverkosta otettua tehoa. Kuvassa on otettu tarkasteluun 48 h ajanjakso, jotta akuston purku- ja lataussyklit olisivat helposti havaittavissa kuvasta.



Kuva 22. Verkosta otettu teho tarkasteltavan päivän aikana.

Kuva 23 esittää esimerkissä käytetyn sähkön hinnan käyrää vuoden tarkastelujaksolla. Sähkön hinta pohjautuu lähteen [55] pörssisähkön aikavälillä 18.4.2022-18.4.2023.

Sähkön hinta on kuvaajassa €/kWh ja siinä ei ole huomioitu sähkönsiirtoa, sähköveroa, huoltovarmuusmaksua eikä arvolisäveroä.



Kuva 23. Pörssisähkön hinta vuoden ajanjaksolle. Muokattu lähteen [55] pohjalta.

Käyttämällä edellä mainittuja parametreja, sekä asettamalla sähkön rajahinnaksi 0,10 €/kWh voitaisiin MATLAB-laskentaohjelmiston mukaan saada säästöä 4 328,00 € vuodessa. Kyseisellä säästöllä investointi jää tappiolliseksi, kuten voidaan huomata taulukosta 10. Säästö saatiin laskettua hyödyntämällä verkosta otettua tehoa akuston kanssa ja ilman akustoa, sekä käyttämällä pörssisähkön tuntikohtaisia arvoja. Kertomalla teho ja sähkön hinta minuutin tarkkuudella saatiin laskettua tunnissa käytetty energia ja sen hinta kaavan $C = \frac{P_t * C_{hinta,t}}{60}$ mukaisesti, missä P_t on teho tietyllä minuutilla, $C_{hinta,t}$ on sähkön hinta tietyllä minuutilla ja C on tunnin aikana käytetyn energian hinta. Summaamalla vuoden kaikkien tuntien hinnat saadaan vuosittaisen energiankulutuksen hinta. Vuotuisen energiankulutuksen hinnan erotus ilman akustoa ja akuston kanssa on saavutettava säästö akustoa hyödyntämällä. Tätä samaa laskutapaa hyödynnetään muidenkin säästöjen laskennassa.

5.3.2 Tehohippujen rajaous ja kuormien tasaaminen

Lähteessä [62] todettiin parhaimpien tuottojen saamisen pohjautuvan siihen, että yhdistetään useampi energiavaraston tuottomahdollisuus. Kuormien tasaaminen ja tehohippujen leikkauksen yhdistäminen on siis lähteen [62] mukaan parempi vaihtoehto kuin edellä läpikäyty hintarajan hyödyntäminen.

Otetaan esimerkki, jossa asiakkaalla on käytössä tehopohjainen sähköliittymä, jonka pätötehomaksu on 2,08 €/kW/kk ja loistehomaksu on 1,25 €/kVAr/kk. Ilman akustoa asiakkaan pätötehomaksu on kuukaudessa 370,00 €, jos latausjärjestelmän täysi teho 180 kW käytetään vähintään kaksi kertaa vuodessa. Tämä tekee 10 vuoden ajanjaksolla 45 000,00 € pätötehomaksuina. Pätötehomaksua ei voida käytännössä kuitenkaan nolata ja realistisempi tavoite olisi, että pätötehomaksut voitaisiin rajata noin 15–35 % pienemmäksi. Lisäksi on huomioitava mahdollinen vaikutus loistehoon. Toteutetaan luvussa 5.3.1 käytettyjen tietojen pohjalta toinen laskelma, jossa otetaan huomioon tehohuippujen leikkaus sekä kuormien tasaaminen.

Ratkaisua varten toteutettiin algoritmi MATLAB-laskentaohjelmistoon, joka ottaa huomioon tehohuippujen leikkauksen ja kuormien tasaamisen. Algoritmin toiminta pohjautuu sähkön hinnan vaihteluun ja maksimitehon rajoittamiseen. Algoritmi tarkistaa tulevan 24 h ajanjaksolta sähkön hintatiedot ja valitsee näistä 4 pienintä tuntihintatietoa. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että sähkön hinnan ollessa alimmillaan energiavarastoa ladataan, kunnes se on täynnä. Algoritmiin on määritelty myös maksimitehoraja, joka asettaa verkosta otetun tehon isoimman mahdollisen arvon. Maksimitehorajaksi asetettiin 128 kW eli 85 % kuormitusprofiilin maksimitehosta 150 kW. Algoritmi laskee siis tarvittavan purkutehon energiavarastolle, jotta verkosta otettu maksimiteho 128 kW ei ylitä. Energiavaraston lataus kuormituksen kanssa on tässä algoritmissa estetty. Energiavaraston lataus tapahtuu siis silloin, kun kuormitusta ei ole. Lataustehoksi on määritetty verkosta otettavissa oleva maksimiteho.

Energiavaraston SoC pyritään pitämään tässä esimerkissä noin 40 % varaustasossa. Tätä varten algoritmiin on kirjoitettu kohta, joka mahdollistaa energiavaraston latauksen millä hinnalla tahansa, jos varaustaso putoaa 40 % alapuolelle. Tämä ehto on tehty, koska jos energiavaraston SoC laskee liian alas ei energiavarastoa pystytä purkamaan tehorojoituksissa pysymiseksi. Seuraavat kaavat kuvaavat algoritmin toimintaa,

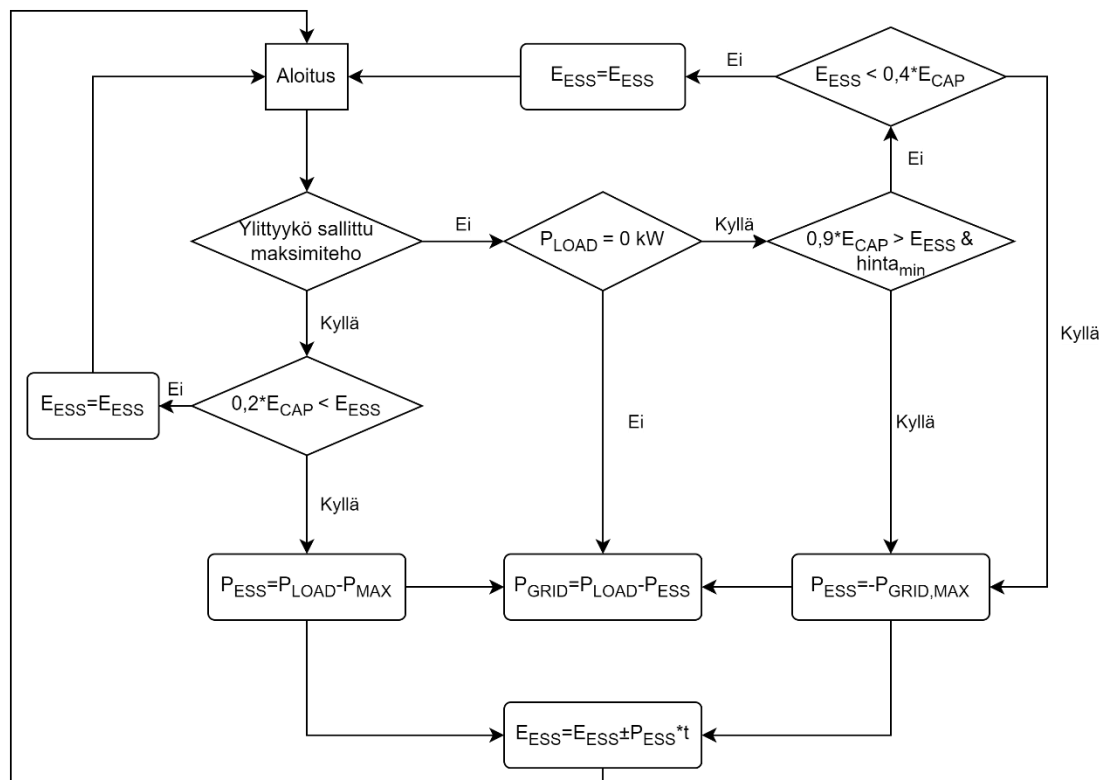
$$P_{\text{GRID,MAX}} = (1 - r) \cdot P_{\text{MAX}} \quad (5)$$

$$P_{\text{ESS}} = \begin{cases} P_{\text{GRID,MAX}} - P_{\text{LOAD}}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} < E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} > P_{\text{GRID,MAX}} \\ -P_{\text{GRID,MAX}}, & 0,9 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW ja } p_{\text{sähkö}} = p_{\text{min}} \\ -P_{\text{GRID,MAX}}, & 0,4 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW} \\ 0 \text{ kW}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} \geq E_{\text{ESS}} \geq 0,9 \cdot E_{\text{cap}} \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{\text{ESS}} = \begin{cases} E_{\text{ESS}} - P_{\text{ESS}} \cdot t, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} < E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} > P_{\text{GRID,MAX}} \\ E_{\text{ESS}} + P_{\text{ESS}} \cdot t, & 0,9 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW ja } p_{\text{sähkö}} = p_{\text{min}} \\ E_{\text{ESS}} + P_{\text{ESS}} \cdot t, & 0,4 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW} \\ E_{\text{ESS}}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} \geq E_{\text{ESS}} \geq 0,9 \cdot E_{\text{cap}} \text{ tai } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{\text{GRID}} = P_{\text{LOAD}} + P_{\text{ESS}} \quad (8)$$

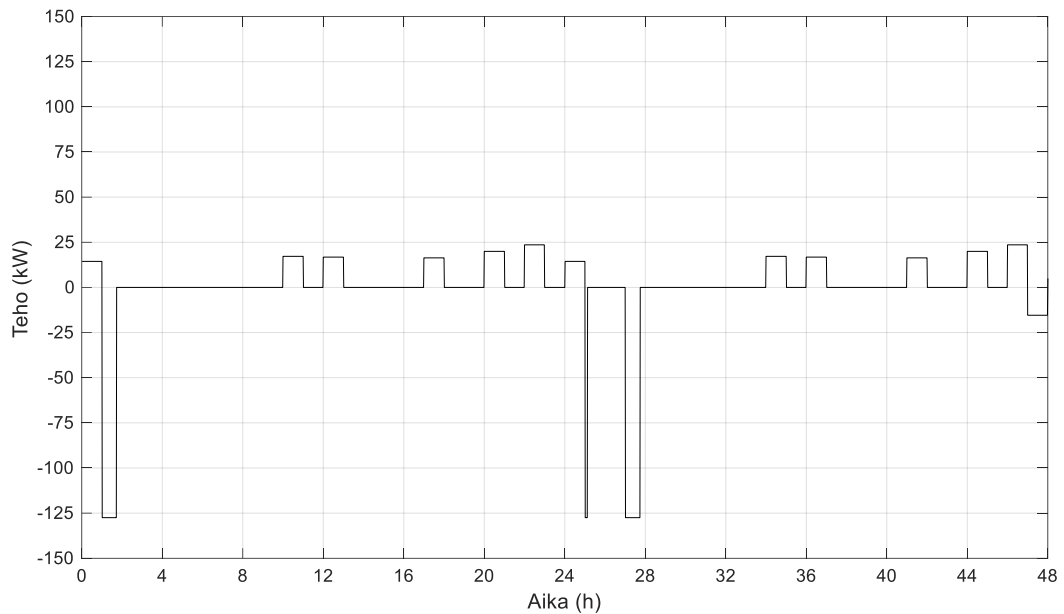
Kaavoissa muuttuja r tarkoittaa tehon rajoituksen määrää maksimista, muuttuja $P_{\text{GRID,MAX}}$ kuvaa verkosta otettavan tehon sallittua maksimitehoa, muuttujat $p_{\text{sähkö}}$ ja p_{min} ovat sähkön hinta ja sähkön minimihinta, muuttuja P_{MAX} kuvaa järjestelmän maksimitehoa, muuttuja P_{ESS} kuvaa energiavaraston purku- ja lataustehoa eri tilanteissa, muuttuja E_{cap} kuvaa energiavaraston kapasiteettia, muuttuja E_{ESS} kuvaa energiavarastoon varastoituneen energian määrää eri ajanhetkillä, muuttuja P_{GRID} kuvaa verkosta otettua tehoa, muuttuja P_{LOAD} kuvaa kuorman ottamaa tehoa ja muuttuja t kuvaa ajanhetkeä. Kaavaa (5) käytetään määrittelemään verkosta otettavan tehon maksimiarvo. Kaava (6) kuvaa energiavaraston purku- ja lataustehon määräytymistä eri tilanteissa. Kaavaa (7) käytetään laskettaessa energiavarastoon varastoituneen energian määrää ja sen muuttumista eri käyttötilanteissa. Kaava (8) kuvaa verkosta otettua tehoa. Toiminnallisuuden havainnollistamiseksi kaavat on muutettu havainnollistavaksi logiikkakaavioksi. Tämä logiikkakaavio on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Ohjausalgoritmin logiikka rajattaessa tehoa.

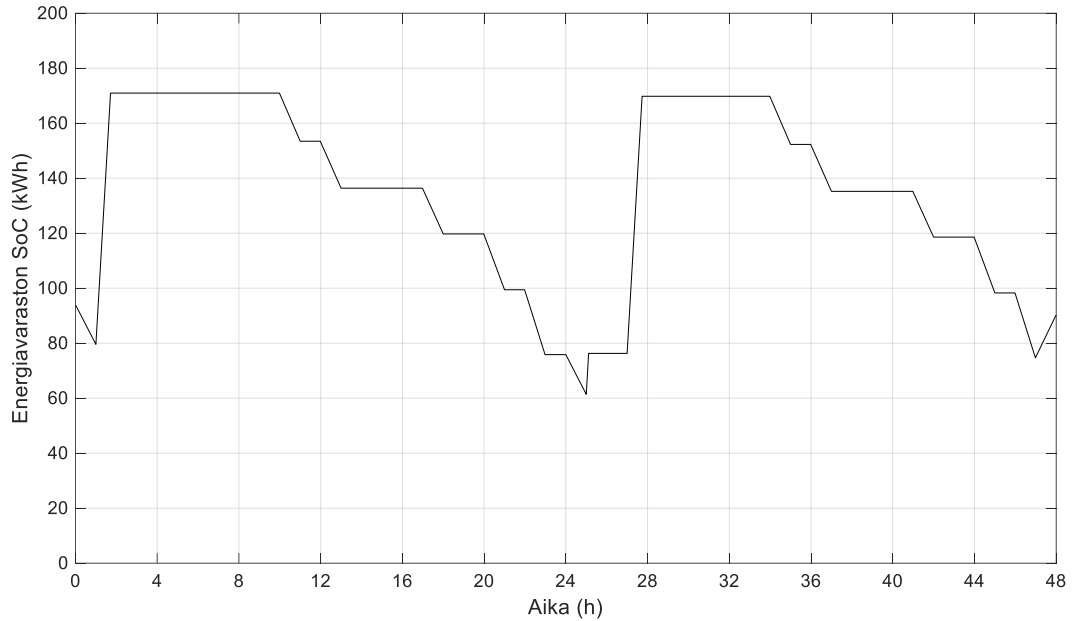
Seuraavaksi esitellään laskennasta saatuja tuloksia. Kuva 25 esittää energiavaraston lataus- ja purkutehoja 48 h ajanjaksolla. Tästä kuvasta on havaittavissa helpommin pur-

kutehojen vaihtelu kuorman tehojen mukaisesti. Purkuteho ei ylitä kuvassa millään ajankohdalla yli 25 kW, sillä tämä purkuteho riittää pitämään verkosta otetun tehon määritellyn maksimitehon rajoissa. Energiavaraston latausteho taas on aina mahdollisimman suuri eli tässä tapauksessa noin 125 kW. Latausteholle saattaa kuitenkin olla tarpeellista asettaa rajoituksia energiavaraston rajoitusten takia tai sen kestävyuden parantamiseksi.



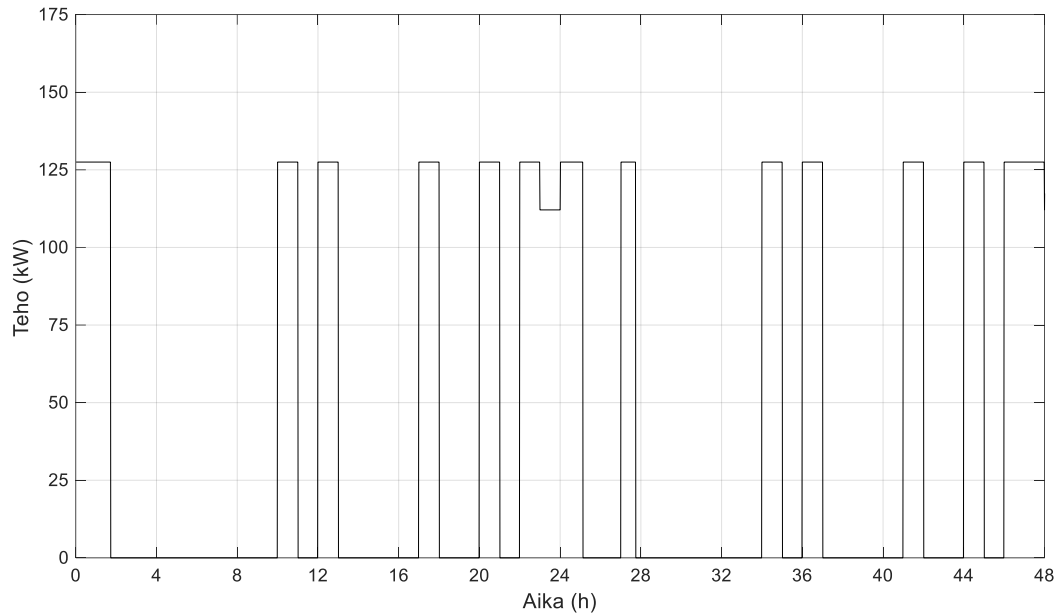
Kuva 25. Energiavaraston lataus- ja purkutehot 48 h ajanjaksolla.

Kuva 25 esittää energiavarastoon varastoitunutta energiamäärää 48 h. Kuvasta voidaan siis havaita vaihteluväli, jolle energiavaraston SoC asettuu sekä eri purku- ja lataustapahtumat. Energiavaraston koko on 188 kWh, josta käytettävissä on 37,6–169,2 kWh. SoC-tason alittaessa 40 % eli 75,2 kWh ladataan energiavarastoa, kunnes 40 % varaus-taso jälleen ylitetään. Näistä rajoista yläraja sekä 40 % SoC-tason ylläpito on selkeästi havainnoitavissa. Lisäksi hyödyntäen MATLAB-laskentaohjelman toiminnallisuuksia, voidaan kuvaajasta laskea vuoden ajalta huippukohtien lukumäärät, joita on 744. Tämä tarkoittaa, että vuoden aikana energiavarastoon on kohdistunut 744 lataus- ja purkusykliä.



Kuva 26. Energiavarastoon varastoitunut energiamäärä 48 h ajanjaksolla.

Kuva 27 esittää verkosta otettua tehoa 48 h pituisella ajanjaksolla. Kuvan perusteella voidaan arvioida energiavaraston lisäämisen vaikutusta verkosta otettuun tehoon. Kuvassa 20 esitetty kuormitusprofiili esittää verkosta otettua tehoa, kun energiavarastoa ei ole kytketty. Tässä kuvassa verkosta otettu maksimiteho on noin 150 kW, kun taas kuvassa 27 maksimiteho ei ylitä missään kohtaan arvoa 128 kW. Maksimiteho 128 kW tulee verkosta otetulle teholle asetetusta raja-arvosta, joten tehon rajaamisessa on onnistuttu. Tehorajoituksen ylityksiä ei tapahdu, vaikka tarkastelujaksoa jatkettaisiin vuoden pituiselle ajanjaksolle.



Kuva 27. Verkosta otettu teho 48 h ajanjaksolla.

Saavutettavissa oleva säästö laskettiin MATLAB-laskentaohjelmiston avulla. Säästö saatiin vertaamalla alkuperäisen kuormitusprofiilin kuluttaman sähkön hintaa akuston avulla tasatun kuormitusprofiiliin kuluttamaan sähköön. Säästöä kertyisi vuodessa 3 824,00 €. Tähän lukemaan lisätään vielä tehohuippujen leikkauksesta saavutettavissa oleva säästö. Pätötehomaksun ollessa 2,08 €/kW/kk, tehomaksujen kautta vuodessa saavutettavissa oleva säästö olisi noin 560,00 €. Yhteensä säästöä kertyy vuodessa 4 384,00 €, joka on 60,00 € enemmän kuin kappaleessa 5.3.1 saatu 4 328,00 € vuosittainen säästö. Lähteen [62] väittämä on tässä käyttötapauksessa käytetyllä datalla paikkaansa pitävä, vaikkakin hyvin pienellä marginaalilla. Toisaalta tässä kohdassa ei ole huomioitu verkkoinvestoinnin lykkäntymistä tai sitä, että latausteho on korkeampi kuin verkosta on mahdollista muuten ottaa. Nämä ovat huomioitavia asioita investoinnin järkevyyttä arvioitavissa, sillä korkeampi latausteho lyhentää latausaikaa. Ajankäytöllä on merkitystä varsinkin logistiikan ja julkisen liikenteen segmenteillä.

Akustolle tulee syklejä vuodessa laskentaohjelmiston mukaan 744. Jos esimerkiksi kuitenkin katsotaan kuvaa 26, ei syklejä pitäisi vuodessa tulla yhtään enempää kuin kappaleen 5.3.1 esimerkissä. Syklien lukumäärä olisi 10 vuodessa 7440, mikä rupeaa olemaan lähellä Li-ion-akulle ilmoitettua eliniän aikaisten syklien maksimia. Syklien lukumäärän kohdalla on siis epävarmuutta, mutta syklien vuosittainen lukumäärä tulee asettumaan välille 257–744.

Jos huipputehorajoitusta halutaan kasvattaa esimerkiksi 15 % → 30 % tarvitsee akuston kokoa väistämättä kasvattaa, sillä laskennassa kyseisellä muutoksella tehoylityksiä tuli useita kymmeniä. Tämä on myös loogisesti perusteltavissa kaavan

$$E = \frac{r}{100 \%} \cdot P \cdot t \quad (9)$$

kautta, missä muuttuja r kuvaa tehon rajoitusta prosentteina, muuttuja P kuvaa tehoa ja muuttuja t aikaa. Tietyn tehon rajoittamiseen tarvitaan aina muuttujan E verran energiaa määritellyllä ajanjaksolla. Kun kaavassa (9) muuttujaa r kasvatetaan, nousee tarvittavan energian määrä. Jos energiavarastoa ei pystytä lataamaan välissä tehorojoitusten puitteissa, tarvitsee energiavaraston kapasiteetin olla vähintään kaavalla (9) saadun energian määrää vastaava. Kaavan (9) mukaista periaatetta voidaan hyödyntää luvussa 6 käytännön toteutuksen suunnittelussa. [52]

5.3.3 Hintaan pohjautuva energiavaraston lataus ja purku

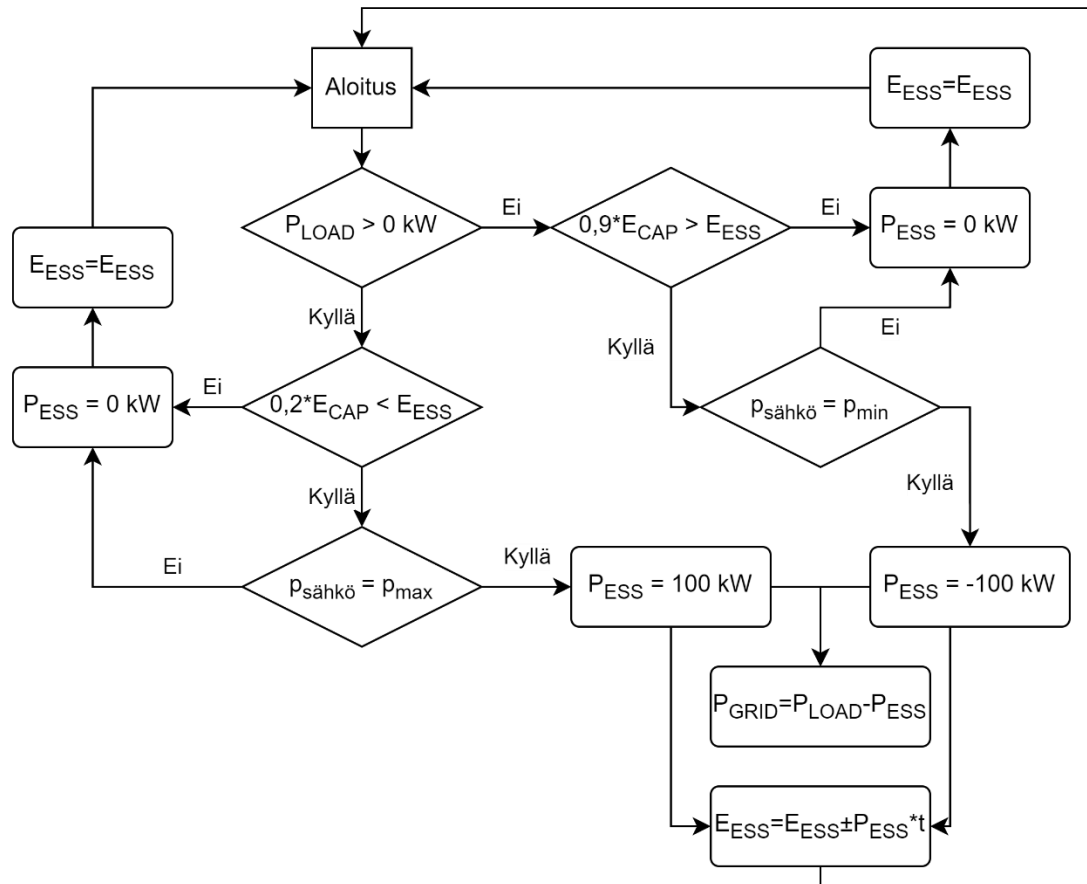
Tässä esimerkissä tarkastellaan energiavaraston lataamista ja purkamista spot-hintojen mukaan. MATLAB-laskentaohjelmistoon toteutettiin algoritmi, joka poimii spot-hinnoista 4 halvinta tuntikohtaista sähkön hintaa ja vastaavasti 4 kalleinta. SoC-rajojen lisäksi algoritmille on määritelty energiavaraston purku- ja latausteholle maksimiarvot. Maksimiarvoiksi on määritelty ± 100 kW. Seuraavat kaavat kuvaavat algoritmin toimintaa.

$$P_{\text{ESS}} = \begin{cases} 100 \text{ kW}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} < E_{\text{ESS}} \text{ ja } p_{\text{sähkö}} = p_{\text{max}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} > 0 \text{ kW} \\ -100 \text{ kW}, & 0,9 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } p_{\text{sähkö}} = p_{\text{min}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW} \\ 0 \text{ kW}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} \geq E_{\text{ESS}} \geq 0,9 \cdot E_{\text{cap}} \end{cases} \quad (10)$$

$$E_{\text{ESS}} = \begin{cases} E_{\text{ESS}} - P_{\text{ESS}} \cdot t, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} < E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} > 0 \text{ kW ja } p_{\text{sähkö}} = p_{\text{max}} \\ E_{\text{ESS}} + P_{\text{ESS}} \cdot t, & 0,9 \cdot E_{\text{cap}} > E_{\text{ESS}} \text{ ja } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW ja } p_{\text{sähkö}} = p_{\text{min}} \\ E_{\text{ESS}}, & 0,2 \cdot E_{\text{cap}} \geq E_{\text{ESS}} \geq 0,9 \cdot E_{\text{cap}} \text{ tai } P_{\text{LOAD}} = 0 \text{ kW} \end{cases} \quad (11)$$

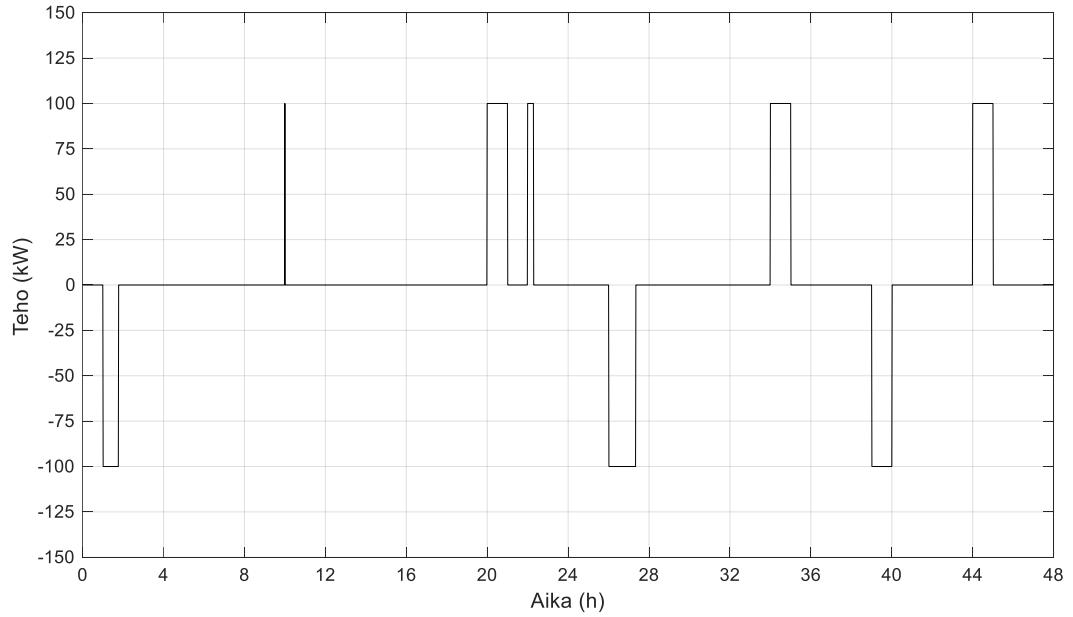
$$P_{\text{GRID}} = P_{\text{LOAD}} + P_{\text{ESS}} \quad (12)$$

Kaavoissa muuttuja P_{ESS} kuvaa energiavaraston purku- ja lataustehoa eri tilanteissa, muuttuja E_{cap} kuvaa energiavaraston kapasiteettia, muuttujat $p_{\text{sähkö}}$, p_{min} ja p_{max} ovat sähkön hinta, sähkön minimihinta ja sähkön maksimihinta. Muuttuja E_{ESS} kuvaa energiavarastoon varastoituneen energian määrää eri ajanhetkillä, muuttuja P_{GRID} kuvaa verkosta otettua tehoa, muuttuja P_{LOAD} kuvaa kuorman ottamaa tehoa ja muuttuja t kuvaa ajanhetkeä. Kaava (10) kuvaa energiavaraston purku- ja lataustehoa eri tilanteissa. Kaava (11) kuvaa energiavarastoon varastoitunutta energiaa ja sen muutosta eri ajanhetkillä. Kaava (12) kuvaa verkosta otettua tehoa. Kaavat on tiivistetty kuvaan 28, joka on ohjausalgoritmin toimintaa kuvaava logiikkakaavio.



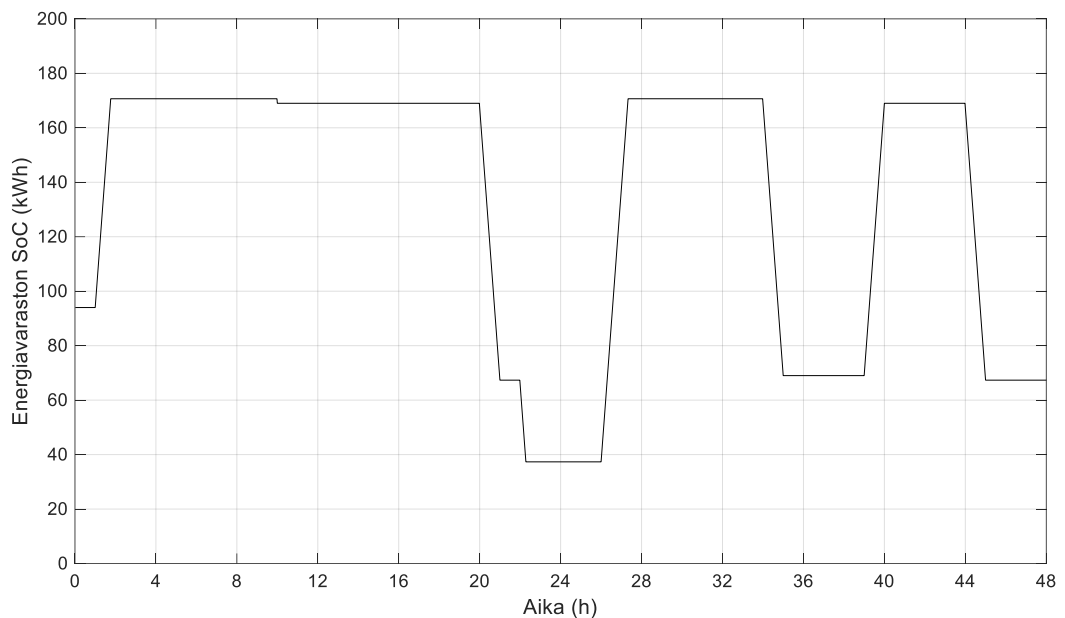
Kuva 28. Hintaan pohjautuvan ohjausalgoritmin logiikka.

Kuva 29 esittää energiavaraston purku- ja lataustehoja 48 h ajanjaksolla. Kuvasta huomataan edellä mainittu lataus- ja purkutehon maksimiarvo. Lisäksi eri lataus- ja purkusyklit ovat selkeästi havaittavissa kuvaajasta.



Kuva 29. Energiavaraston purku- ja latausteho 48 h ajanjaksolla.

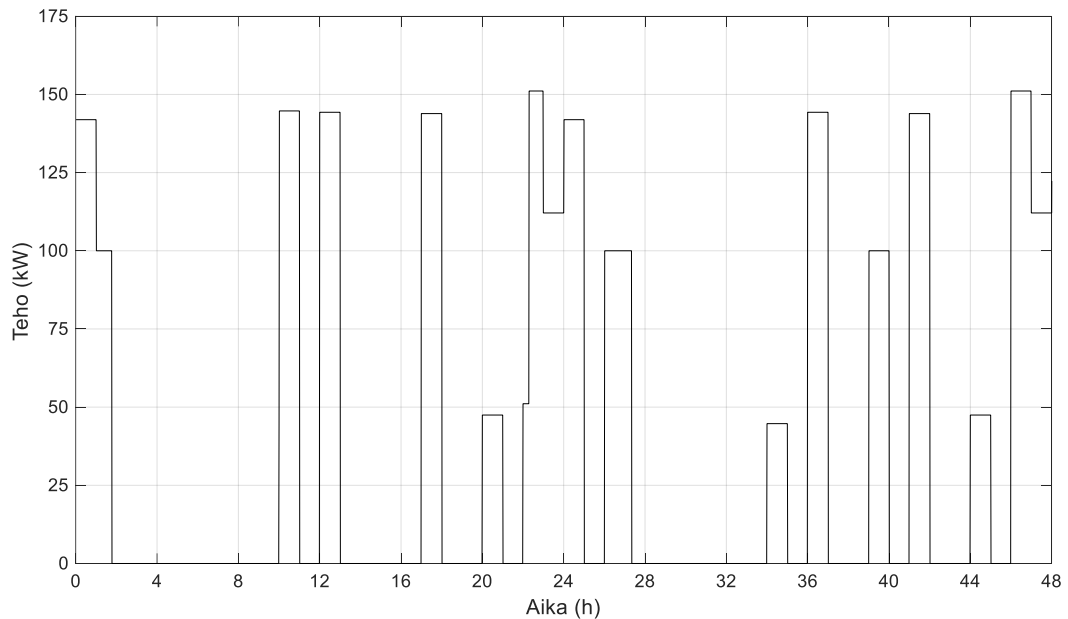
Kuva 30 esittää energiavarastoon varastoitunutta energiaa. Kuvasta nähdään, että energiavaraston SoC laskee käytännössä aina kuormituksen yhteydessä alle 50 % käytettävissä olevasta alueesta, josta se latautuu nopeasti takaisin 90 % SoC-tasolle.



Kuva 30. Energiavarastoon varastoitu energiamäärä 48 h ajanjaksolla.

Kuva 31 kuvaa verkosta otettua tehoa 48 h ajanjaksolla. Latausykliä voi huomata kuvasta, sillä verkosta otetaan tällöin 100 kW ja purkusyklien kohdalla verkkoon kohdistuva

teho on 25–50 kW. Koska tässä tapauksessa verkosta otettavalle teholle ei ole asetettu maksimirajoitusta, kuormaprofiilin maksimiarvot eivät muutu.



Kuva 31. Verkosta otettu teho 48 h ajanjaksolla.

Laskennan tuloksista saadaan mahdolliseksi säästöksi tällä menetelmällä 6 543,00 € vuodessa. Vuodessa syklejä tulee laskennan tuloksien mukaan 388. Säästöä tällä sähkön spot-hintojen maksimivaihtelua hyödyntävällä menetelmällä tulee 1 200,00 € enemmän kuin hintarajaa hyödyntävällä menetelmällä.

5.3.4 Yhteenveto eri laskelmista

Edellä tarkasteltiin saavutettavissa olevaa suoraa säästöä energiavaraston avulla käyttäen erilaisia menetelmiä. Tuloksia on kerätty taulukkoon 11. Taulukon tuloksista voidaan huomata, että kaikkien laskelmien tulos on negatiivinen eli tappiollinen. Yksikään menetelmä ei tee investointia kannattavaksi tämänhetkisillä energiavaraston hankintakustannuksilla. Laskelmiin ei ole kuitenkaan otettu huomioon muita energiavaraston tuomien hyötyjen arvoa. Osa näistä hyödyistä on subjektiivisia ja osan arviointia on hyvin vaikea toteuttaa tarkasti, kuten esimerkiksi keskeytyksistä syntyviä kustannuksia.

Taulukko 11. 100 000 € investoinnilla saavutettava tuotto vuodessa.

Menetelmä	Säästö (€/a)	Tuotto (€/a)
Hintaraja	4 328,00	-8 622,00
Kuormahuippujen leikkaus ja tasaaminen	4 384,00	-8 566,00
Hintaan pohjautuva purku ja lataus	6 543,00	-6 407,00

Taulukkoon 12 on kerätty saavutettava tuotto, kun oletetaan akkupohjaisten energiavarastojen hinnan puolittuvan arvosta 500 €/kWh arvoon 250 €/kWh. Tällöin hintaan pohjautuva purku ja lataus -menetelmä saavuttaa tulosta, kun muut menetelmät pysyvät vieläkin tappiollisena. Akkupohjaisten energiavarastojen hinnoissa tapahtuu muutoksia jatkuvasti ja on mahdollista, että akkujen hinnat putoavat tulevaisuudessa arvoon 250 €/kWh.

Taulukko 12. 50 000 € investoinnilla saavutettava tuotto vuodessa.

Menetelmä	Säästö (€/a)	Tuotto (€/a)
Hintaraja	4 328,00	-2 147,00
Kuormahuippujen leikkaus ja tasaaminen	4 384,00	-2 091,00
Hintaan pohjautuva purku ja lataus	6 543,00	68,00

Kaikista edellä käsitellyistä potentiaalisimmat ovat kuormahuippujen leikkaus ja tasaaminen sekä hintaan pohjautuva energiavaraston purku ja lataus. Näistä enemmän suoraa tuottoa tuo hintaan pohjautuva purku ja lataus, mutta tällä menetelmällä ei pystytä tuomaan yhtä montaa erilaista etua kuvassa 14 esitellyistä mahdollisuuksista. Esimerkiksi varavoimana toimiminen edellyttää, että energiavarastossa on varausta jäljellä. Mutta kuten kuvasta 30 nähdään, energiavarasto puretaan yleensä tyhjäksi asti ja uudelleenlataus tapahtuu vasta, kun sähkön hinta on alhainen. Tällöin on mahdollista, että energiavaraston varaustilanne on liian alhainen varavoimana toimimisen mahdollistamiseksi. Tehohippujen rajauksessa energiavaraston SoC pysyy aina vähintään 40 % varauksessa, jolloin siinä on tarvittaessa aina käytettävissä edes vähän varavoimaa. Lisäksi kyseinen ratkaisu rajoittaa verkosta otettavaa tehoa ja mahdollistaa verkkoinvestointien lykkäämisen tai poistaa investointitarpeen kokonaan. Vastaavasti kyseinen ratkaisu mahdollistaa lataamisen isommalla teholla kuin verkko muuten sallisi.

Tällä hetkellä on siis vaikeaa perustella energiavaraston toteuttamista pelkästään edellä käsiteltyjen ansaintatapojen avulla. Tulevaisuudessa hintataso voi laskea tarpeeksi alas, jotta tämä olisi kannattavaa. Energiavaraston toteuttamisen reunaehto hyödyntäen pelkästään edellä mainittuja ansaintatapoja on se, että akkujen hinnat putoavat arvoon 250 €/kWh.

Lopuksi on hyvä vielä muistuttaa, ettei pelkkä kannattavuus kerro koko totuutta tällaisen investoinnin perusteltavuudesta. Vaikka kannattavuuden kautta tällainen investointi ei olisikaan perusteltu, on kuitenkin muistettava luvun 5.1 hyödyt ja se, että joissakin tilanteissa nämä muut hyödyt voivat olla asiakkaalle/yritykselle huomattavasti arvokkaampia kuin pelkät rahalliset hyödyt.

6. ENERGIAVARASTON INTEGRAATIO SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSRATKAISUUN

Tässä luvussa käsitellään käytännön toteuttamiseen liittyviä asioita ja dokumentoidaan valmistelussa tehtäviä asioita ja suunnitteluratkaisuja. Tarkoituksena on saada toteutettua energiavaraston ja latausratkaisun yhdistelmä sekä myös kirjata ylös huomioitavia asioita ja ratkaista mahdollisia ongelmia, joita integraation valmistelusta löytyy.

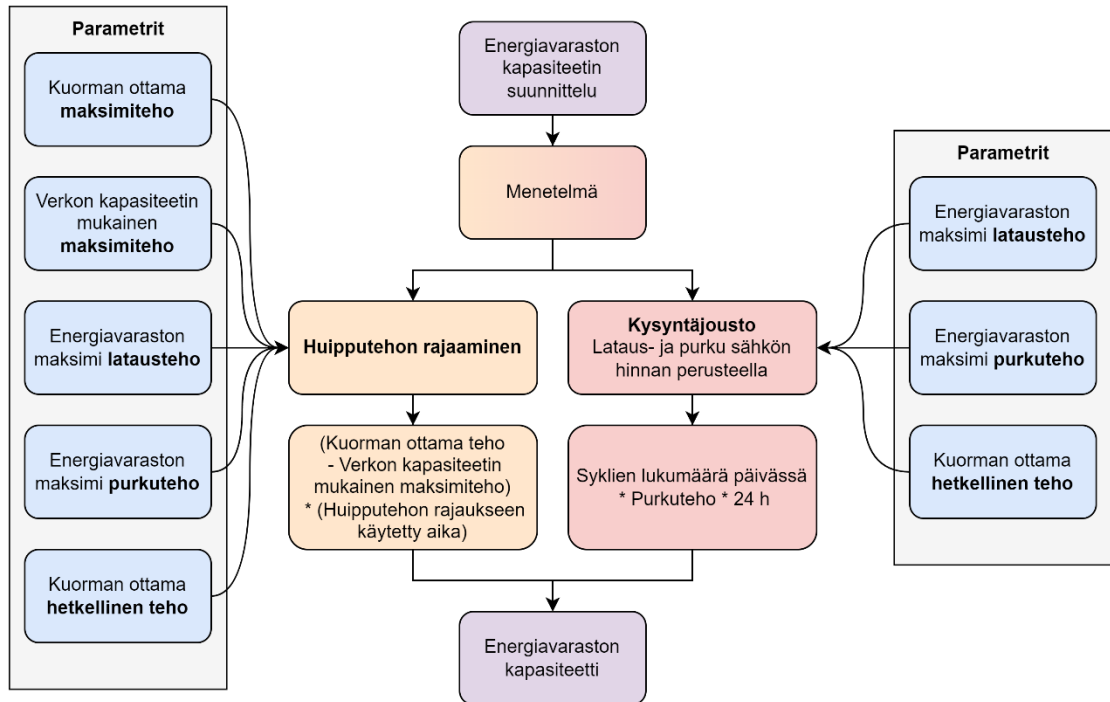
Integraatiossa hyödynnettävän energiavaraston suunnittelussa on huomioitava luvussa 3 esitettyjen tietojen pohjalta energiavaraston purku- ja latausteho, energiavaraston kapasiteetti sekä koko. Käytettävän energiavaraston purku- ja latausteho tarvitsee olla sopeva käytettävän menetelmän kanssa. Esimerkiksi kuormahuippujen leikkauksessa purkutehon tarvitsee vastata vain leikattavan tehon määrää, kun taas muissa ratkaisuissa purkutehon tulisi olla sama maksimikuormituksen kanssa. Lataustehon suuruus saa olla pienempi kuin maksimikuormitus, mutta tällöin on huomioitava latausajan pitenemisen vaikutus energiavaraston käyttöön. Purku- ja latausteho liittyvät suoraan energiavaraston kapasiteetin suunnitteluun, jota käydään tarkemmin läpi luvussa 6.1.

6.1 Akuston koon suunnittelu

Akuston koon suunnittelu on moniulotteinen ongelma, ja siihen vaikuttavat muun muassa akuston lataus- ja purkuteho, akuston SoC-rajat, eri komponenttien hyötysuhteet, kuormitusprofiili ja sähkön hinta. Jos akustoa halutaan käyttää tehohuippujen rajaamiseen, tarvitsee tehorajaukseen tarvittava energiamäärä pystyä arvioimaan. [60][61][64][65]

Akuston koon suunnittelussa voidaan hyödyntää lähteitä [60][61][64][65] ja laskennan tuloksia. Akuston käyttötarkoitus vaikuttaa oleellisesti suunnittelussa käytettäviin parametreihin. Pääperiaate akuston suunnittelussa on silti tilanteesta riippumatta sama eli riittävän energiamäärän varmistaminen.

Kuvaan 32 on koottu kaksi eri menetelmää ja tarvittavat toimet niiden vaatiman energiavaraston koon suunnittelemiseksi. Kyseiseen kuvaan on koottu tarvittavat parametrit kummallekin menetelmälle ja periaatteellinen kaava, jota hyödyntämällä saadaan energiavaraston koko.



Kuva 32. Energiavaraston kapasiteetin suunnittelemisen periaatekuva.

Suunniteltaessa lataustehon rajoittamiseen perustuvaa energiavarastoa tarvitsee kuorman ottama latausteho pystyä arvioimaan. Tarvittava energiavaraston kapasiteetti on selvitettävissä kaavaa (9) hyödyntämällä. Jos käytettävissä on aikaisempaa dataa vastaavasta latauspisteestä samantyyllisellä kuormituksella, voidaan aikaisemman datan pohjalta etsiä huonoin mahdollinen tilanne. Huonoin mahdollinen tilanne on sellainen, jossa tehorajan ylityksiä on eniten ja niiden kesto on pisin. Jos dataa ei ole käytettävissä, voidaan arviointi tehdä hyödyntämällä latausratkaisun maksimitehon ja rajoitetun maksimitehon välistä erotusta ja laskemalla tämän tehon tarvitsema energian määrä 24 h ajanjaksolla. Todellisuudessa näin suurta kapasiteettia tarvitaan vain silloin, kun huipunkäyttöaika on 100 %, joka ei käytännössä tule ikinä tapahtumaan latausratkaisujen yhteydessä. Lataustapahtuman aikana latausteho putoaa akuston kapasiteetin täytyessä [40], jolloin huipunkäyttöaika ei voi olla enää 100 %. Toisaalta on myös luonnollista olettaa, että jokaisena hetkenä latausasemassa ei ole ladattavaa ajoneuvoa. Lisäksi on huomioitava lataukseen kuluva aika, jotta energiavaraston varaustila ehtii täytyä purkusyklin jälkeen. [52][60][61][64]

Koon suunnittelu on astetta hankalampaa, kun halutaan käyttää energiavarastoa pelkäämään tuoton ja käyttövarmuuden lisäämisessä. Tällöin kyse on enemmän optimointiongelma eli haetaan kokoa, jolla tuotto on kyseisellä kuormituksella suurin suhteessa investointiin. Tällaisessa ongelmassa olisi hyödyllistä tietää kuormitusprofiili mahdollisimman tarkasti, jotta ongelman ratkaisu olisi tarkka. Kuormitusprofiilia ei kuitenkaan

useimmiten ole käytettävissä etukäteen ja joudutaan arvioimaan latausratkaisun kuormitusprofiili. Lisäksi esimerkiksi sähköhinnan vaihtelevuus vaikuttaa ratkaisuun. Arvion energiavaraston suuruudesta voi kuitenkin tehdä esimerkiksi arvioimalla energiavarastoon päivässä kohdistuvien syklien lukumäärän ja tehon pohjalta. [60][61][64]

Työn toimeksiantajan kanssa on keskusteltu, että akuston kokona voitaisiin tarjota muutamaa valmista pakettia. Tällaisessa tapauksessa akuston koon suunnittelussa riittäisi se, että varmistetaan mikä näistä valmispaketeista riittää kuhunkin tarpeeseen. Tämä vähentää akuston koon suunnittelutyökalun tarvetta ja siirtää huomion ennemminkin työkaluun, jolla voidaan tarkistaa akuston sopivuus kuhunkin kohteeseen. Toisaalta tällaisessa tapauksessa työkalun tekeminen saattaa olla turhaa työtä, jos akustojen integraatiossa on jo valmiiksi mukana aihepiirin osaava työntekijä.

6.2 Integraation tekemisessä huomioitavat asiat ja tarvittavat lähtötiedot

Käytännön integraation toteutukseen liittyy erinäisiä standardeja ja käytännön tarpeita ratkaisun toimivuuden varmistamiseksi. Akustojen integraatioon liittyen on olemassa ST-kortistot 52.30.01–52.30.03 ja 55.37, joissa käsitellään akkuenergiavarastoja ja akkutiloja [45][68][69][70]. Käytännön asioista esiin nousevat varsinkin turvallisuuteen liittyvät asiat, ja näiden lisäksi akuston jäähdyttämiseen/lämmittämiseen liittyvät asiat Suomen olosuhteissa. Akuston sijoitus tulee useasti olemaan ulkotiloissa, jolloin akuston käyttölämpötilan tulee olla valmistajan määrittelemien rajojen sisäpuolella. Akustojen lämpötilalla on merkittävä vaikutus akuston toimintaan [13] ja lämpötilan ylläpitämisellä on väistämättä käyttökustannuksia. Lisäksi käytännön toteutuksessa akkuteknologian valinta konkretisoituu, käyttötarkoitus pitää olla kartoitettuna ja akun koon suunnittelu pitää olla toteutettuna.

Akkuihin liittyviä turvallisuusvaatimuksia on määritelty standardeissa SFS-EN IEC 62485-1:2018 ja SFS-EN IEC 62485-5:2021. [66][67] Näissä standardeissa otetaan kantaa turvallisessa toteutuksessa huomioitaviin asioihin. Kyseiset standardit tarkentavat myös muita standardeja tai viittaavat muihin standardeihin esimerkiksi sähköturvallisuuden osalta. Sähköturvallisuudesta säädetään myös Suomen sähköturvallisuuslaissa 1135/2016. Standardien lisäksi on otettava huomioon akustojen asennuksessa ja integraatiossa akuston valmistajan määrittelemät vaatimukset. Nämä vaatimukset voivat koskea esimerkiksi jäähdytystä, mekaniikkasuunnittelua, kiinnityksen toteuttamista ja akuston sähköistämiseen liittyviä rajoituksia. Sähköturvallisuudella varmistetaan henkilöiden turvallisuus korkean jännitteen aiheuttamilta vaaroilta. Sähköturvallisuuden näkökulmasta standardi SFS-EN IEC 62485-5 edellyttää, että akkuasennus varustetaan

perussuojauksella ja vikasuojauksella. Perussuojauksen idea on estää jännitteisten osien koskeminen ja vikasuojauksen idea on estää vaarallinen kosketusjännite.

Akkupohjaisen energiavaraston integraatio latausratkaisuun pohjautuu ohjelmistolla toteutettavaan ratkaisuun. Tässä tapauksessa ohjelmiston pitää kommunikoida energiavaraston kanssa hyödyntäen CAN-väylää. Ohjelmistolle on välitettävä tarvittavat parametrit, kuten lataus- ja purkuteho, SoC-rajat, SoC-tavoite, sähkön markkinahinta ja verkosta otettavan tehon sallittu maksimiarvo. Ohjelmistoon on toteutettava myös algoritmi, joka hoitaa energiavaraston latauksen ja purkamisen käyttötapauksen mukaan. Käyttötapauksia ja näiden ohjausalgoritmit käytiin läpi luvuissa 5.3.1, 5.3.2 ja 5.3.3. Tarvittavat parametrit riippuvat osittain toteutettavan latausaseman sijainnista ja käyttäjäryhmästä eli segmentistä. Segmentin vaikutus latausaseman suunnitteluun on huomioitava, jotta toimitettava latausratkaisu on kyseiselle segmentille sopiva. Tämä pohjautuu eri segmenttien latausratkaisujen eroaviin tehotarpeisiin ja latauspisteiden lukumäärään [3].

6.3 Integraation toteutuksen vaiheet

Seuraavaksi käydään läpi integraation toteutuksen vaiheita periaatteellisesti. Tarkoituksena on luoda yleishyödyllinen prosessi, jota voidaan seurata energiavaraston integraatiota suunniteltaessa.

6.3.1 Integraation toteutuksen suunnitteluprosessi

Integraation toteutus lähtee liikkeelle sijoituspaikan sekä sijoitettavan latausaseman tehon selvittämisestä. Tässä prosessin vaiheessa asiakas on ottanut yhteyttä ja pyytänyt tarjousta latausaseman sijoittamisesta tai vaihtoehtoisesti latausasemaa on oma-aloitteisesti kartoitettu sijoitettavaksi tiettyyn sijaintiin. Latausaseman teho voi tulla suoraan vaatimuksena asiakkaalta tai sitten asiakas voi pyytää tarjouksen soveltuvasta järjestelmästä. Oma-aloitteisessa suunnittelussa kartoitetaan kohteen segmentti ja latausaseman teho määräytyy tämän mukaan.

Latausaseman tehon kartoittamisen jälkeen kartoitetaan paikallisen sähköverkkoyhtiön kanssa latausaseman sijoituspisteessä käytettävissä oleva verkon kapasiteetti. Verkon kapasiteetti määrittää sen, onko kyseessä heikko vai vahva sähköliittymä. Kapasiteetin ollessa riittämätön haluttuun lataustehoon nähden, on kyseessä heikko sähköliittymä. Toisaalta kapasiteetin riittäessä toivottuun lataustehoon, on kyseessä tarpeeksi vahva sähköliittymä.

Heikon sähköliittymän tapauksessa seuraavaksi neuvotellaan sähköverkosta otettavan tehon maksimiarvo, ottaen samalla huomioon muut sähköliittymässä olevat kuormitukset. Sähköverkosta otettavan tehon maksimiarvon selvittämisen jälkeen arvioidaan lataustehon riittävyys yhdessä asiakkaan kanssa. Jos asiakkaalle riittää tämä rajoitettu latausteho, voidaan asiakkaalle toimittaa latausasema, joka on suunniteltu sallitun maksimitehnon mukaan. Muussa tapauksessa vaihtoehtoina on energiavaraston rakentaminen tai sähköverkon vahvistaminen, joka voi tulla hyvinkin kalliiksi. Tämän takia tässä tapauksessa on tehtävä kustannusarvio ja pohdittava kumpi valinnoista on kustannustehokkaampi. Jos päädytään vahvistamaan sähköliittymää, voidaan valmistaa latausasema alkuperäisen toivotun lataustehon mukaisesti. Jos kuitenkin päädytään siihen, että on kustannustehokkaampaa rakentaa akusto, pohditaan akuston integraatiota ja suunnittelua tarkemmin.

Vahvan sähköliittymän tapauksessa asiakkaalle voidaan toimittaa toivottu latausasema ilman tarvetta verkon vahvistamiselle tai energiavaraston toteuttamiselle. Asiakkaalle voidaan kuitenkin tarjota mahdollisuutta lisätä latausaseman osaksi energiavarasto. Tällöin asiakkaalle perustellaan luvussa 5.1 selostetut hyödyt ja tehdään kannattavuusarvio. Jos asiakas päätyy hankkimaan energiavaraston latausaseman osaksi, tarkastellaan integraatiota ja suunnittelua tarkemmin.

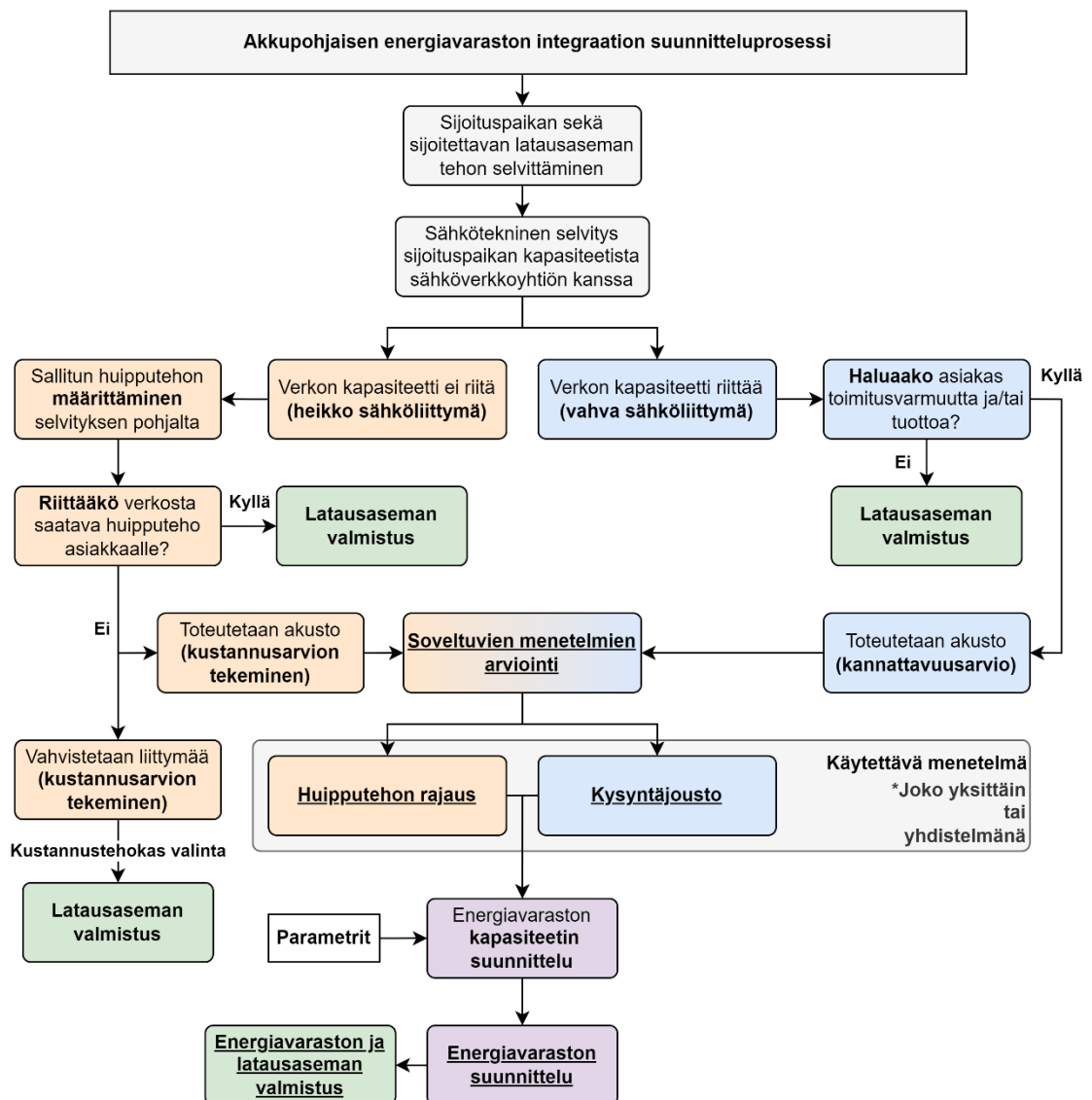
Päädyttäessä toteuttamaan energiavarasto, tarvitsee käyttökohteen mukaisesti valita oikea menetelmä energiavaraston ohjaukseen. Heikon sähköliittymän tapauksessa käytettävä menetelmä voi olla joko huipputehon rajaus tai kysyntäjoustopuolteen ja huipputehon rajauksen yhdistelmä. Vahvan sähköliittymän tapauksessa soveltuvat menetelmät ovat joko kysyntäjoustopuolteen ja kysyntäjoustopuolteen rajoituksen yhdistelmä. Lopulliseen menetelmään vaikuttaa kustannus- ja kannattavuusarvio, sekä sähköliittymän asettamat rajoitukset. Nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että heikon sähköliittymän tapauksessa on pakko käyttää huipputehon rajausta, mutta muuten valinta voidaan tehdä kustannus- ja kannattavuusarvion pohjalta.

Menetelmän valinnan jälkeen siirrytään energiavaraston kapasiteetin määrittämiseen. Kapasiteetin suunnittelua käytiin tarkemmin läpi luvussa 6.1. Hyödyntämällä kappaaleissa mainittuja asioita voidaan suunnitella sopivan kokoinen energiavarasto. Valittu menetelmä vaikuttaa suunnittelussa tarvittaviin parametreihin ja samalla saadaan erilaiset tulokset energiavaraston koolle menetelmän mukaan.

Energiavaraston kapasiteetin suunnittelun jälkeen prosessi etenee itse energiavaraston suunnitteluun. Energiavaraston suunnittelua käydään läpi tarkemmin myöhemmin luvussa 6.3.2.

Energiavaraston suunnitteluprosessin valmistuttua, voidaan edetä prosessin viimeiseen vaiheeseen eli energiavaraston sekä latausaseman rakentamiseen. Energiavarasto toteutetaan suunnitelmien mukaisesti ja latausasema taas valmistetaan vastaamaan alkuperäisen toiveen mukaista lataustehoa. Lopputuotteena syntyy valmis tuotepaketti, joka voidaan toimittaa asiakkaalle.

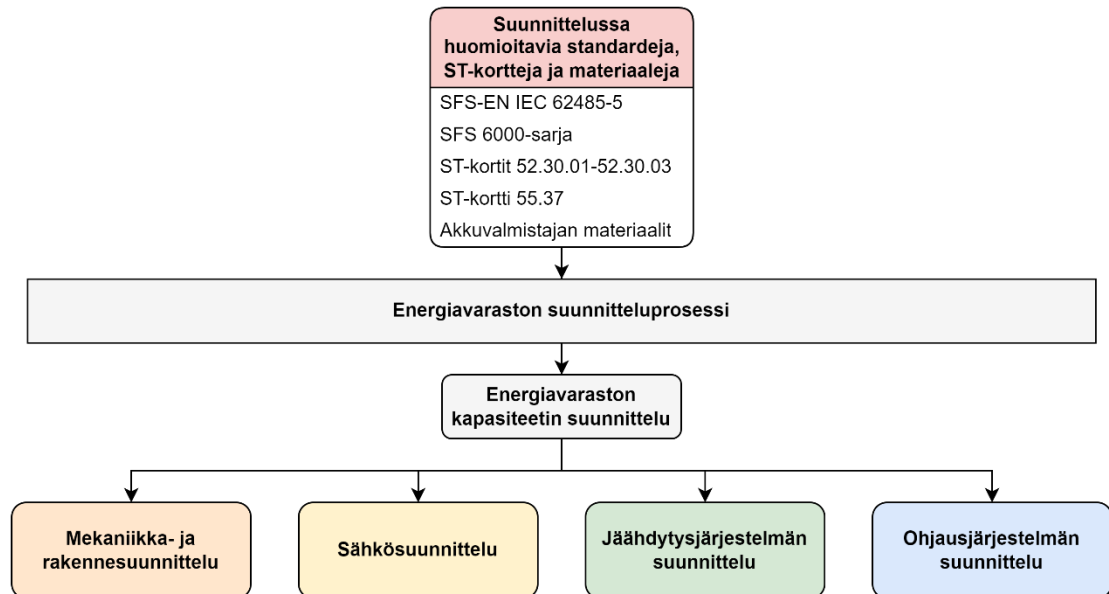
Kuvassa 33 on kuvattuna edellä esitetty prosessi kaaviona. Kaavion tarkoituksena on havainnollistaa prosessia ja auttaa oikeanlaisten ratkaisujen kanssa. Samalla prosessin toistettavuuden on tarkoitus helpottua.



Kuva 33. Integraation suunnitteluprosessin yleinen kuvaus.

6.3.2 Energiavaraston suunnitteluprosessi

Energiavaraston suunnitteluprosessin pohjana toimii luvussa 6.2 mainitut julkaisut. Energiavaraston suunnitteluprosessi voidaan jakaa eri ryhmiin. Suunnitteluprosessi on jaettu tässä energiavaraston kapasiteetin suunnitteluun, mekaniikka- ja rakennesuunnitteluun, sähkösuunnitteluun, jäähdytysjärjestelmän suunnitteluun sekä ohjausjärjestelmän suunnitteluun. Käydään seuraavaksi läpi tarkemmin näistä neljää jälkimmäistä. Kuva 34 esittää yleiskuvana suunnitteluprosessia ja suunnittelussa hyödynnettäviä lähtötietoja. [47]



Kuva 34. Energiavaraston suunnitteluprosessi.

Mekaniikka- ja rakennesuunnittelussa keskitytään energiavaraston mekaanisiin ja rakenteellisiin ominaisuuksiin. Mekaniikka- ja rakennesuunnittelussa tärkeintä on varmistaa akustojen, sähkölaitteiden ja jäähdytysjärjestelmän sijoittelu yhteiseen standardien ja ohjeistuksien mukaiseen tilaan. Tällainen tila voi olla esimerkiksi akkukontti. Taloyhtiön tai teollisuuskiinteistön tapauksessa sopiva tila voi olla erillinen tarkoituksen mukainen huonetila. Sijoittelun jälkeen tärkeää on varmistaa kestävä kiinnitys sähkölaitteille, jäähdytysjärjestelmälle ja varsinkin akuille. Standardista SFS-EN IEC 62485-5 löytyy vaatimus akkutilan lattiarakenteen kestävyuden varmistamiselle, sillä kapasiteetiltaan yli 50 kWh olevat akut painavat useita satoja kiloja. Varsinkin valmiiseen huonetilaan sijoitettaessa on tehtävä tarkka tarkastelu, sillä huonetilan suunnittelussa käytetty hyötykuorman määrä ei välttämättä ole mitoitettu tällaiselle kuormitukselle. Samasta standardista löytyy myös vaatimukset poistumisteiden leveydelle ja ovien lukitusmekanismille. Poistumistien leveydestä löytyy muitakin arvoja, joista pitää tulkita tilanteeseen sopiva. Akkutilan on

oltava lukittava, mutta sieltä on päästävä sisäkautta helposti ulos esimerkiksi paniikkisalvan avulla. Nämä asiat otetaan huomioon energiavaraston mekaniikka- ja rakennesuunnittelussa. [45][67][68]

Sähkösuunnittelun komponenttien valinnassa ja niiden suunnittelussa huomioitavia asioita voidaan kartoittaa lähteen [47] avulla. Lisäksi sähkösuunnittelussa auttaa sekä ST-kortti 55.37 [45], että standardi SFS-EN IEC 62485-5 [67]. Sähkösuunnittelu voidaan jakaa sähköturvallisuuden huomioimiseen [45][67][71], komponenttien suunnitteluun ja mitoitukseen [47], sähkökaavioiden suunnitteluun ja piirtämiseen sekä sähkötekniseen mitoittamiseen [71]. Sähköturvallisuuden osalta lähteessä [67] viitataan suomalaiseen SFS 6000 -standardisarjaan, joka on saatavilla standardikäsi kirjana [71]. Jos energiavaraston jännitetasot ylittävät 1 000 V (AC) tai 1 500 V (DC) sovelletaan kuitenkin suurjännitestandardia SFS 6001. Sähköturvallisuuden osalta energiavarasto on suunniteltava siten, että sähköiskun vaara ihmiselle on poistettu perussuojauksella. Perussuojaus voidaan toteuttaa esimerkiksi kosketussuojauksella, esteillä tai sijoittamalla jännitteiset osat kosketusetäisyyden ulkopuolelle. Erillisen akkutilan tai esimerkiksi akkukontin tapauksessa perussuojaus tulee toteutettua esteiden avulla, sillä lukittavat ovet akkutilaan laskeaan esteeksi.

Vikatilanteen aikainen vaarallisen kosketusjännitteen muodostuminen on estettävä vikasuojauksella. Vikasuojauksen pitää poistaa jännite viallisesta verkon osasta. Lisäksi tällainen tila, jossa on akkuja ja jännitetaso ylittää 120 V (DC), tarvitsee merkitä asianmukaisin varoitusmerkein, jotka on määritelty lähteessä [67]. Kuvassa 35 on esitetty luonnos siitä, miten tällainen akkuhuone voidaan merkitä standardin edellyttämällä tavalla. Komponenttien suunnittelu ja mitoitus riippuu käytettävän järjestelmän teho- ja jännitetasosta. Lähteen [47] avulla saadaan yleiskuva tarvittavista komponenteista. Tämän lisäksi voidaan hyödyntää luvussa 4.5 esiteltyä järjestelmän yleiskuvaa. Sähkökaavion piirtäminen tehdään, kun järjestelmän komponenttien suunnittelu on valmis ja energiavaraston kaikki muutkin osat ovat suunniteltu. Tällöin voidaan koota koko energiavaraston yhteinen sähkökaavio. Sähkösuunnittelussa on syytä käyttää kokenutta tai aihealueeseen perehtynyttä sähkösuunnittelijaa. [67][71]



Kuva 35. Akkuhuoneen standardien mukainen merkintä. Muodostettu lähteen [72] avulla.

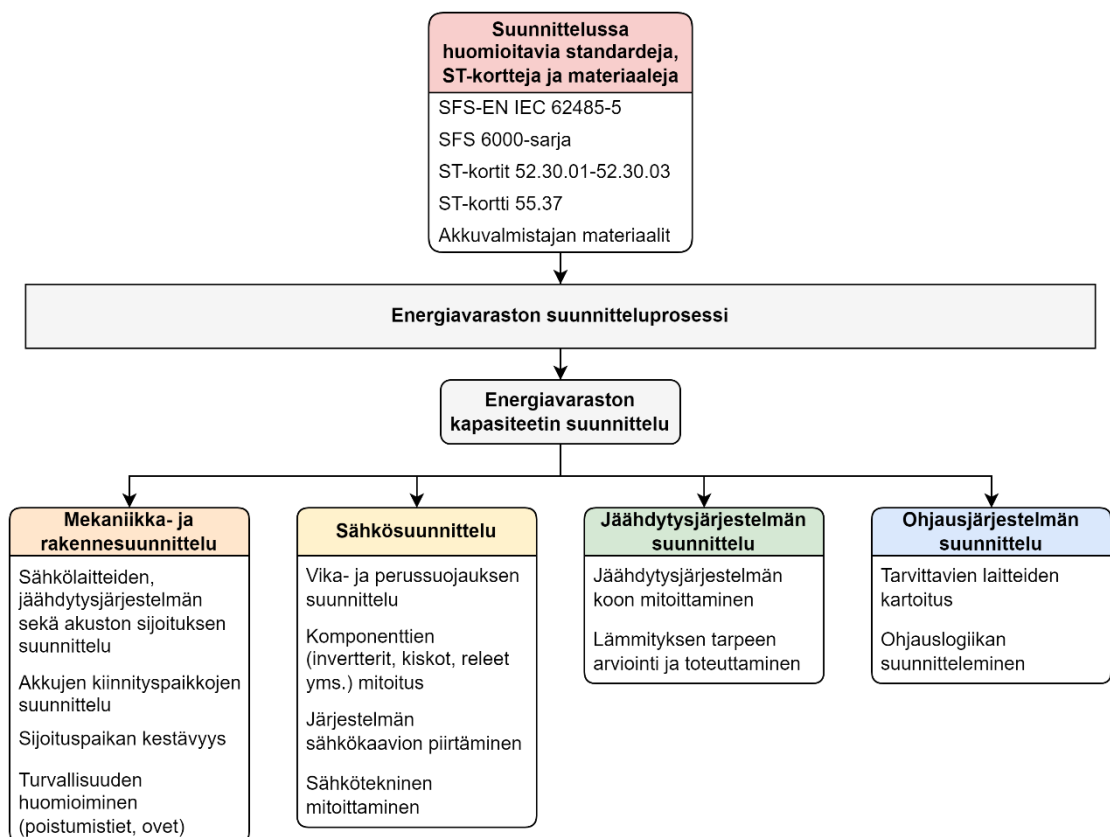
Kuten aikaisemmin luvussa 6.2 mainittiin, akustojen lämpötilan ylläpitäminen on kriittinen toiminto. Sitä varten energiavaraston yhteyteen on suunniteltava soveltuva jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmä. Tämän järjestelmän suunnittelussa hyödynnetään akkuvalmistajan materiaaleja, sillä akkuvalmistaja osaa parhaiten määritellä akuston jäähdytykseen ja lämmitykseen liittyvät parametrit, kuten jäähdytystehon, lämmitystehon ja lämpötilarajat tietyillä lataus- ja purkutehoilla. Näiden tietojen pohjalta osaava jäähdytysjärjestelmien valmistaja kykenee rakentamaan kyseiseen energiavarastoon jäähdytysjärjestelmän.

Ohjausjärjestelmän suunnittelemisen on koko energiavaraston toiminnan kannalta kriittisin suunnitteluvaihe, sillä koko järjestelmän toiminta vaatii kaikkien komponenttien välisen yhteistoiminnan. Luvussa 3.1 käytiin läpi akuston ohjausjärjestelmiä ja akustoon liittyviä muita järjestelmiä. Suunnittelussa tarvitsee lisäksi huomioida luvun 4.5 ja lähteen [47] esittämät huomiot järjestelmän topologiasta. Ohjausjärjestelmän suunnittelussa lähdetään liikkeelle eri järjestelmien yhteyksien selvittämisestä. Kuten luvussa 3.1 esitetyistä kuvista 2 ja 3 nähdään, tarvitsee energiavaraston ohjausjärjestelmän olla yhteydessä järjestelmän tehoelektronikan (PCS), tehonhallinnan (PMS), akuston ohjausjärjestelmän (BMS) sekä valvonta- ja ohjausjärjestelmän kanssa (esim. SCADA). Näiden järjestelmien ohjaamiseen voi olla olemassa omia laitteita, joita voidaan hyödyntää ohjaamisessa.

Ohjausjärjestelmän suunnittelu kannattaa aloittaa akuston ohjausjärjestelmän vaatimusten huomioimisella. Näitä vaatimuksia on esimerkiksi jäähdytysjärjestelmän ohjaus ja lataus- ja purkutehon määrittäminen. Näissä vaatimuksissa voi olla paljonkin vaihtelua eri akkuvalmistajien välillä, ja näitä tietoja varjellaan tarkasti. Kun nämä vaatimukset on kartoitettu ja huomioitu, voidaan siirtyä miettimään miten akuston ohjausjärjestelmä, te-

hoelektroniikka ja tehonhallinta kannattaa integroida toistensa kanssa. Tehoelektronikan ohjaamisessa periaate on se, että järjestelmää pyydetään tuottamaan sähköä, joka vastaa haluttuja ominaisuuksia. Tällöin energiavaran ohjausjärjestelmä välittää tehoelektronikalle tiedon tuotettavasta sähköstä ominaisuuksineen, jolloin tehoelektronikan ohjaus tekee tarvittavat ohjaustoimet. Tuotettavan sähkön ominaisuudet riippuvat siitä käytetäänkö yhteistä AC-kiskoa vai yhteistä DC-kiskoa. Tehonhallinta on tärkeä huomioida, kun käytetään energiavaraa huipputehon rajaukseen. Tällöin energiavaran ohjausjärjestelmän on pakko jatkuvasti kommunikoida tehonhallinnan kanssa, jotta rajoitukset on jatkuvasti huomioitu. Lopuksi kaikkien edellä mainittujen toimet ja keräämä data kerätään yhteen valvonta- ja ohjausjärjestelmään.

On hyvä kuitenkin huomioida, että käytännön toteutuksessa jokainen osa-alue tarvitsee käydä erikseen läpi. Tämän lisäksi on hyvä tarkistaa, että kaikki tarvittavat asiat tulee huomioitua. Kuva 36 sisältää pääpiirteittäin jokaiseen suunnittelukohteeseen liittyviä asioita, jotka auttavat hahmottamaan kokonaisuuden suunnittelua.



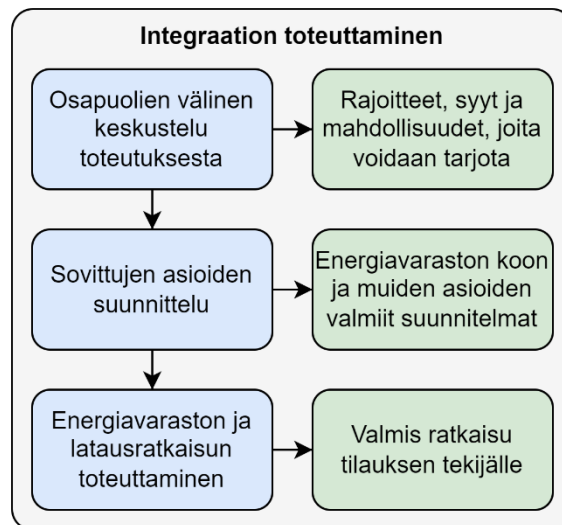
Kuva 36. Energiavaran suunnitteluprosessin yhteenveto ja huomioitavat asiat.

6.3.3 Integraation toteuttamisen yhteenveto

Luvuissa 6.3.1 ja 6.3.2 käyty asiat ovat tällaisen ratkaisun valmistukselle kriittisiä vaiheita. Luvuissa käytyjen asioiden avulla energiavarastoprojektin suorittaminen suoraviivaistuu ja saadaan prosessi, jota hyödyntämällä päästään projektin kaikki vaiheet läpi.

Integraation toteutus voidaan summata siten, että projektin alussa käydään läpi toteutuksen osapuolien kanssa toteutukseen liittyvät rajoitteet, syyt ja mahdollisuudet, joita voidaan tarjota. Kun nämä asiat on kartoitettu ja niistä on sovittu, voidaan edetä sovittujen asioiden suunnitteluun, joka alkaa energiavaraston koon suunnittelulla. Energiavaraston koon suunnittelun jälkeen voidaan siirtyä integraation tarkempaan tapauskohtaiseen suunnitteluun, johon kuuluu kuvassa 36 esitetyt vaiheet. Kun kaikki on muuten valmiiksi suunniteltu, voidaan toteutus valmistaa ja toimittaa tilauksen tekijälle.

Koko integraation toteuttaminen voidaan tiivistää yhteen kuvaajaan, joka on esitelty kuvassa 37. Kuvan sinisiin lokeroihin on koottu toimenpiteet, joita integraation toteuttaminen vaatii. Vihreissä lokeroissa on kuvattu mitä kunkin toimenpiteen jälkeen pystytään tekemään tai mitä pitää tehdä.



Kuva 37. Integraation toteuttamisen yhteenveto.

7. VIINIKAN JULKISEN LATAUSASEMAN VALMISTUS

Tässä luvussa läpikäydään todellisen projektin, eli Viinikan julkisen latausaseman toteutusta. Sijointipaikkana toimiva Viinikka on Tampereella sijaitseva kaupunginosa, joka on keskeisellä paikalla lähi- ja runkologistiikan näkökulmasta. Viinikkaan toteutettava latausasema tulee olemaan ensimmäinen julkinen ammattiliikenteen latausasema. [73] Julkiselle latausasemalle toimitettavaan järjestelmään toteutetaan erillinen akkukontti, johon on sijoitettu akusto. Erillisen akuston lisäksi tässä toteutuksessa hyödynnetään Plugitin omaa Hube-suurteholatausjärjestelmää. Toteutettavaan ratkaisuun suunnitellaan sopiva erillinen akusto. Ratkaisuun liitettävä 360 kW Hube-suurteholatausjärjestelmä on jo valmiiksi kehitelty tuote, joten sen suunnittelua ei tarvitse toteuttaa erikseen.

Toteutettavan projektin avulla on tarkoitus varmentaa konseptin toimivuus ja integraation toteutuksen onnistuminen. Samalla pystytään keräämään mahdolliset huomiot ja havainnot ajoissa ja niihin voidaan myös reagoida ajoissa.

7.1 Viinikan julkisen latausaseman suunnittelu ja rakentaminen

Seuraavaksi käydään läpi Viinikan latausasemalle tulevan akuston ja latausjärjestelmän suunnittelua ja rakentamista. Tarkoituksena on varmentaa, että luvun 6 tiedoilla voidaan toteuttaa suunnittelu sujuvasti ja samalla nähdään käytännössä suunnitteluprosessin toteutuminen. Luku on jaoteltu akuston suunnitteluun ja rakentamiseen, ohjelmiston suunnitteluun ja toteuttamiseen sekä akuston ja latausjärjestelmän integraation toteuttamiseen.

7.1.1 Akuston suunnittelu ja rakentaminen

Projektin toteutusta varten tarvittiin erillinen kontti, jonka sisälle tarvittavat laitteistot ja akut sijoitettiin. Projektin toteutukseen valittiin NMC-akkukemian mukaiset litiumioniakut. Projektissa käytetty kontti tilattiin tilaustyönä, jotta tarvittavat laitteet ja akut mahtuivat sisälle. Erillisen akkukontin kokoonpano tehtiin erillään muusta tuotannosta tuotantotalissa. Kriittisimmät työvaiheet kokoonpanossa olivat akkujen mekaanisen kiinnityksen suunnittelu ja testaus, akuston sähköistys ja akuston jäähdytyksen/lämmityksen tekeminen.

Projektin komponenttien eli akkukontin ja latausjärjestelmän sijoituskohteen kestävyys tarvitsee arvioida kuten luvussa 6.3.2 mainittiin. Akkukontin pohjan kestävyys on varmistettu, eli se kestää akkujen painon. Viinikan tapauksessa itse akkukontin sijoituspaikka on nurmialuetta, joten akkukontin painon takia sille tarvitsee tehdä kestävä perustus. Perustus Viinikassa tulee olemaan betonilaatta, joka on mitoitettu akkukontin ja latausjärjestelmän mittojen sekä painojen mukaisesti.

Mekaanisessa suunnittelussa ja testauksessa akuston kiinnitys rakennettiin akun valmistajan ohjeiden avulla. Ohjeistuksen mukaisella kiinnityksellä varmistetaan akun paikallaan pysyminen sekä yläreunasta että alareunasta. Ohjeistuksen pohjalta todettiin parhaaksi ratkaisuksi kiinnittää akusto päältä kiskorakenteella. Tämä kiskokiinnitys mahdollistaa akun kiinnityksen johonkin kiinteään rakenteeseen, kuten esimerkiksi akkukontin seinään tai muuhun telineeseen. Alareunan kiinnityksen kannalta paras ratkaisu on laskea akku sen pohjassa olevia kohdistusreikiä vastaavien vastinkappaleiden päälle. Akkuvalmistajan mukaan tällainen kiinnitys alareunasta on riittävä. Yrityksen mekaniikkasuunnittelijat suunnittelivat akun mittojen mukaan telineen, jossa oli paikka kiskokiinnitykselle sekä pohjassa oikeanlaiset vastinkappaleet. Teline taas voidaan pultata kiinni akkukontin pohjaan. Akut pystytään nostamaan telineen avulla akkukonttiin sivuovesta. Akun pohjassa oli myös valmiiksi asennettuna kumimatto, jonka tarkoituksena on pienentää akkuun mahdollisesti kohdistuvaa värinää, sekä auttaa akuston paikallaan pysymisessä.

Mekaniikkasuunnittelussa otettiin huomioon myös sähkökaappien sijoittaminen ja muiden sähkökomponenttien sijoittaminen akkukonttiin. Sähkökaappeihin sijoitetaan kaikki sähköjärjestelmän tulot ja lähdöt sekä katkaisijat, joten mekaniikkasuunnittelussa näille pitää varmistaa reitit ja paikat. Akun PCS-järjestelmän suuntaajien koon ja painon takia niille piti suunnitella oma tuettu teline, jossa otettiin lisäksi huomioon kaapeleiden syötöreitit ja suuntaajien suodattimien sijoittelu.

Akuston sähköistyksen prosessi kattoi tarvittavat liitännät akun ja muun sähköjärjestelmän välille. Sähkösuunnittelun päävastuu oli Plugitin sähkötöiden johtajalla, sillä hänellä on vaaditut pätevyydet sekä aikaisempaa kokemusta sähkösuunnittelusta. Hän toimii lisäksi kasauksen aikaisena sähkötöiden valvojana, kuten sähköturvallisuuslaki edellyttää. Sähkösuunnittelussa keskityttiin siihen, että tarvittavat sähköiset liitännät järjestelmien välillä toteutetaan noudattaen sähköturvallisuusmääräyksiä. Samalla huomioitiin järjestelmän komponenttien tarve ja muut sähköjärjestelmiin liittyvät tuotantotekniset asiat. Sähkösuunnittelussa toteutettiin myös akkukontin ja latausjärjestelmän kaapeloinnin suunnittelu sekä ulkoisen verkon liitännöiden suunnittelu. Tarvittavien komponenttien

joukkoon kuuluivat esimerkiksi katkaisijat, päävirtakytkimet, virtalähteet, sulakkeet ja vikavirtasuojat.

Akuston PCS-järjestelmän tekemisessä hyödynnettiin luvussa 4.5 esitellyjä latausratkaisujen ja energiavarastojen yhdistämisen vaihtoehtoja. Kuten luvussa käytiin läpi, akusto voidaan yhdistää joko suoraan yhteiseen DC-kiskoon tai DC/AC-suuntaajan kautta AC-kiskoon. Tämä voidaan tehdä joko yksi- tai kaksisuuntaisilla suuntaajilla. Projektissa käytetyt suuntaajat ovat yksisuuntaisia. Tarkoituksena on liittää akusto sen purkua varten kahden suuntaajan kautta (DC/DC → DC/AC) yhteiseen AC-kiskoon, sillä DC/AC-suuntaajan jännitetaso ei olisi ollut muuten sopiva akuston kanssa. Suuntaajien lisäksi järjestelmään liitettiin AC- ja DC-kiskoihin omat suodattimet. AC-kiskoon liitettiin LCL-suodatin ja DC-kiskoon energiavarastojen yhteyteen suunniteltu suodatin. Suodattimien tarkoituksena on parantaa sähkön laatua ja varmistaa vaihtosuunnatun sähkön standardin mukaisuus. Käytännön yhdistämistä näiden suuntaajien ja suodattimien osalta ei tämän työn puitteissa ehditty tekemään, sillä suuntaajien toimitusaika venyi pitkäksi. Akuston lataus toteutetaan erillisillä DC-teholähteillä, sillä niitä oli valmiiksi saatavilla. DC-teholähteitä käytettiin toimituksen venymisen minimoimiseksi ja kustannusteknisten syiden takia. Tämän ratkaisun huonona puolena on heikompi hyötysuhde, sillä häviöllisiä komponentteja on enemmän. Toisaalta akuston käyttömahdollisuudet ovat monipuolisemmat, sillä akustolla voidaan helpommin tukea tulevaisuudessa mahdollisesti lisättäviä AC-latureita.

Useamman akkupaketin käyttäminen rinnan kasvattaa järjestelmän kapasiteettia, mutta samalla se edellyttää akkupakettien BMS-järjestelmien välistä kommunikaatiota. Tämä pystyttiin toteuttamaan tekemällä akkupakettien välille CAN-väylä, jota pitkin akut kommunikoivat. Käytettävän akuston ohjausjärjestelmät vaativat lisäksi erillisen turvapiirin, joka valvoo ja varmistaa liittimien olevan paikallaan. Turvapiirin tarvitsee olla suljettu, jotta akusto voidaan kytkeä jännitteiseksi. Turvapiiriin on lisäksi mahdollista asettaa muita sensoreita, jotka voivat valvoa esimerkiksi akkukontin ulko-ovien aukeamista. Turvapiirin käytännön toteutus tapahtui tekemällä turvapiirin koskettimien välille oikeanlainen johdotus.

Akkujen sijoittelu suhteessa toisiinsa on toteutettava siten, että niille on mahdollista järjestää yhteinen nestejäähdytysjärjestelmä ja niiden ympärille jää tarpeeksi tilaa ilman kierrolle. Projektin toteutusta varten akuston nestejäähdytysjärjestelmä tilattiin näihin järjestelmiin erikoistuneelta yritykseltä. Nestejäähdytyksen toteuttamista varten yritykselle toimitettiin akkujen valmistajan määrittelemät parametrit tarvittavalle nesteen virtaukselle sekä jäähdytystehon määrälle. Nestejäähdytysjärjestelmän mukana toimitettiin järjestelmän ohjaukseen tarvittavat tiedot.

Jäähdytyksen toteutuksesta Plugitin vastuulle jäi toteuttaa nestekierto akkujen ja jäähdytysjärjestelmän kanssa. Nestekierto toteutetaan tekemällä tarvittavat putkitukset ja liitokset jäähdytysjärjestelmän ja akkujen välille. Jäähdytyksen lisäksi oli tarpeen huomioida lämmitys talvipakkasten takia. Lämmityksellä varmistetaan akkujen pysyminen käyttölämpötilarajojen sisäpuolella. Lämmitys voidaan toteuttaa lämmittämällä jäähdytysjärjestelmän nestekiertoa tai vaihtoehtoisesti lämmittämällä akuston sijaintipaikan eli esimerkiksi erillisen akkukontin sisäilmaa. Toisaalta akuston valmistajan tiedoista saadaan selville akkupakettien tuottama lämpökuorma, kun akut ovat käytössä. Tämän lämpökuorman akut luovuttavat niitä ympäröivään tilaan, jolloin lämmitystä ei tarvita yhtä paljon. Toisaalta, jos akut eivät ole kokoaikaisessa käytössä, ei myöskään akustojen tuottama lämpökuorma ole käytettävissä kokoaikaisesti akkujen sijoituspaikan lämmittämiseen.

Viinikan julkisen latausaseman katolle asennettiin lisäksi aurinkopaneeleja, jotka mahdollistavat paikallisen sähköenergian tuotannon. Asentamalla aurinkopaneeleja kontin katolle, saadaan tuotettua osa lataukseen käytetystä ja oheisjärjestelmissä kuluva sähköstä paikallisesti. Samalla saadaan käytännön esimerkki yhdestä hyödystä, joka löydettiin kirjallisuuslähteiden kautta, eli uusiutuvien energianlähteiden integroinnin helppoudesta. Aurinkopaneelien asennuksen teki kontin rakentanut yritys, mutta lopullinen integrointi latausjärjestelmän sekä energiavaraston kanssa jäi toteutettavaksi Plugitille.

7.1.2 Ohjelmiston suunnittelu ja toteuttaminen

Akuston lataaminen ja purkaminen, sekä sen yhteistoiminta latausjärjestelmän kanssa vaatii ohjelmiston, kuten luvussa 6.3.2 on pohjustettu. Tämä ohjelmisto suunnitellaan ja toteutetaan yrityksessä sisäisesti hyödyntäen akkuvalmistajan, tehoelektroniikan sekä jäähdytysvalmistajan rajapintoja. Ilman toimivaa ohjelmistoa, ei akustoa ja sen integraatiota voida toteuttaa. Tällaisen järjestelmän tekeminen vaatii osaamista useammalta osalta. Toteutuksen tekeminen on siis järkevintä toteuttaa isomman työryhmän yhteistyönä, jossa on sekä ohjelmointiosaamista, että ymmärrystä siitä, mitä pitää toteuttaa. Diplomityön rooli oli ohjelmiston toteuttamisessa jälkimmäinen.

Ohjelmiston toteuttaminen aloitettiin suunnittelulla. Suunnittelussa piti ensiksi selvittää mitkä rajapinnat pitää huomioida ja mitä protokollia rajapinnat käyttävät kommunikointiossaan. Kun rajapinnat ja protokollat saatiin selville, voitiin koostaa ohjelmiston toteutuksen suunnitelma. Ensimmäiseksi suunniteltiin ja toteutettiin ohjelmat, jotka tulkitsevat tarvittavat viestit ja mahdollistavat näiden viestien hyödyntämisen, kun ohjelmisto niitä

tarvitsee. Tämän jälkeen toteutettiin ohjelma, joka hyödyntää näitä viestejä tarpeen mukaan. Tällä vaiheella tarkoitetaan tässä lähinnä akuston jäähdytysjärjestelmän, energia-varaston ohjausjärjestelmien ja tehoelektroniikan ohjausjärjestelmien integroimista toisiinsa. Lopuksi järjestelmä liitettiin olemassa olevaan kuormanhallintaan, joka on koko ratkaisun sydän. Suunnittelun lisäksi tarvittavat kommunikaatioväylät järjestelmien välille oli toteutettava fyysisesti. Fyysisen johdotuksen tekeminen järjestelmien välille toteutettiin hyödyntämällä valmistajien tietoja. Tässä tapauksessa johtosarja suunniteltiin sisältämään CAN-väylän tarvitsemat johdot sekä muiden datayhteyksien tarvitseman Ethernet-verkon kaapelit. Käydään seuraavaksi läpi ohjelmiston toteutuksen prosessia.

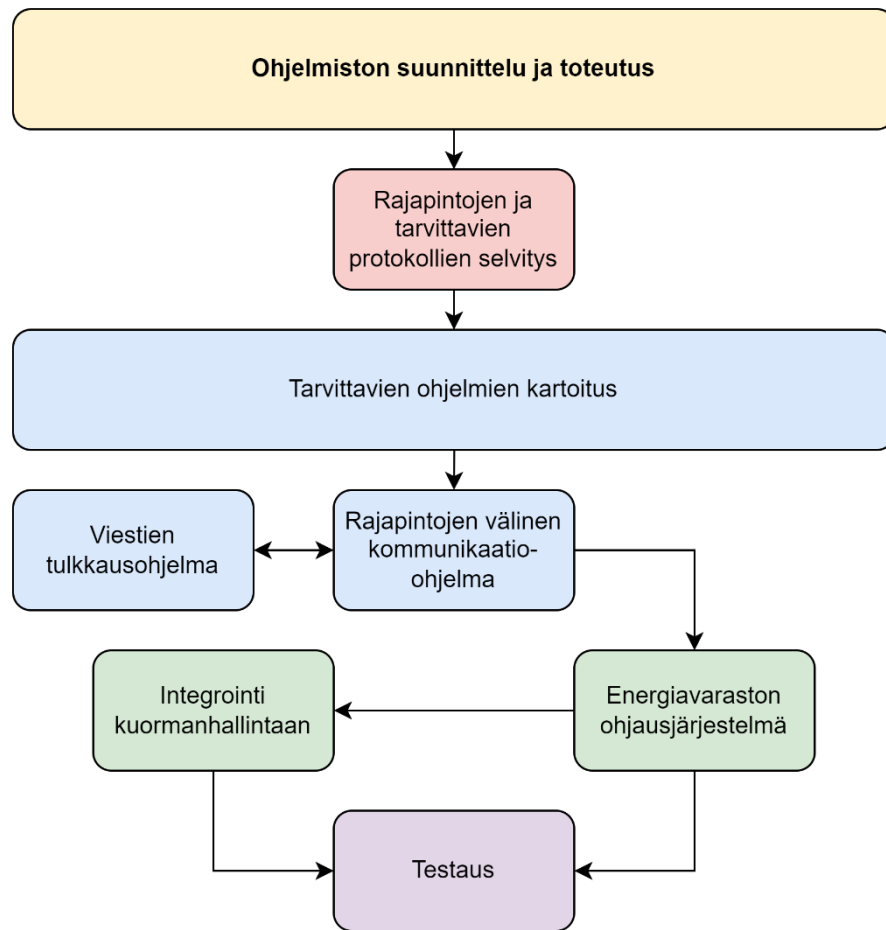
Rajapintojen kommunikaatio toistensa kanssa tapahtuu toteutettavassa järjestelmässä pääasiassa hyödyntämällä CAN-väylää. CAN-väylää pitkin kulkee valmistajien määrittämien mukaisia viestejä, jotka tulkitaan ohjelman ymmärtämiksi viesteiksi. Ensimmäinen vaihe ohjelmiston toteutuksessa oli siis toteuttaa ohjelma, joka lukee näitä viestejä ja tulkitsee ne sopivaan muotoon. Väylällä kulkevien viestien tulkitseminen osoittautui kuitenkin työlääksi tehtäväksi, vaikka viestit ovatkin standardoituja. Viestien tulkkauksen toteuttamisessa hyödynnettiin standardin lisäksi akkuvalmistajan ja jäähdytysjärjestelmän toimittajan antamia tietoja heidän käyttämistään viesteistä. Viestien tulkkauksen implementointiin ohjelmiston seuraavaan vaiheeseen, jossa eri ohjausjärjestelmät kommunikoivat toistensa kanssa.

Seuraavaksi ohjelmiston toteuttamisessa tehtiin ohjelma, jossa näitä edellä mainittuja viestejä sekä mahdollisia muita viestejä hyödynnetään. Viestien hyödyntämisellä tarkoitetaan sitä, että toteutettava ohjelma voi viestiä muiden järjestelmien kanssa ja toteuttaa toimintoja näiden viestien pohjalta tai vastaavasti välittää tietoa. Toteutettavan ohjelmiston pitäisi kyetä viestimään energiavaraston ohjausjärjestelmän, jäähdytysjärjestelmän ohjauksen ja tehoelektroniikan ohjausjärjestelmien kanssa. Energiavaraston ohjausjärjestelmä asettaa rajoitukset lataus- ja purkuteholle ja ilmoittaa akuston varauksen tilan. Nämä lataus- ja purkutehon rajoitukset välitetään ohjelman avulla sekä tehoelektroniikan ohjausjärjestelmälle että kuormanhallinnalle. Energiavaraston ohjausjärjestelmä välittää myös tiedot jäähdytyksen ja lämmityksen tarpeesta ohjelmalle, joka välittää tiedon taas jäähdytysjärjestelmälle, joka tekee tarvittavat toimet. Lisäksi energiavaraston ohjausjärjestelmälle välitetään tieto siitä, ladataanko vai puretaanko akustoa ja millä teholla sitä tullaan tekemään.

Lopuksi toteutettiin koko akkuenergiavaraston ja siihen liittyvien järjestelmien yhdistäminen kuormanhallinnan kanssa. Kuormanhallinta määrittää akuston purku- ja lataussyklit yhdessä latausratkaisun ohjaamisen kanssa. Akuston purku- ja latausteho määritetään kuormanhallinnan avulla siten, että pystytään toimittamaan mahdollisimman paljon tehoa

kuormitustilanteen mukaisesti. Kuormanhallinnalla on siis vastuu siitä, että latausratkaisu toimittaa ladattavalle kohteelle tehoa ja varmistaa mahdollisten tehorajoitusten huomioimisen.

Ohjelmiston toimivuutta testattiin erinäisten testien avulla ennen sen yhdistämistä järjestelmään. Tarkoituksena oli varmistaa etukäteen järjestelmän haluttu toiminnallisuus. Ennen toimitusta järjestelmää on kuitenkin testattava vielä oikealla kokoonpanolla. Oheiseen kuvaan 38 on tiivistetty ohjelmiston toteuttamisen prosessi.



Kuva 38. Ohjelmiston suunnittelun ja toteuttamisen prosessi.

Oman ohjelmiston lisäksi akkuvalmistajalla on oma diagnostiikkasovellus sekä internetin välityksellä toimiva etähallintajärjestelmä, josta voidaan hoitaa akuston ylläpitoon liittyviä toimintoja. Etähallintajärjestelmän ominaisuuksiin lukeutuu ohjelmistopäivitykset, akuston tilan tarkastelu ja ilmoitukset vikatilanteista. Diagnostiikkasovellus on paikallinen työkalu, jolla on mahdollista tarkastaa yksittäisten akkujen vikailmoitukset ja tehdä muutoksia akun asetuksiin.

Lopputuloksena toteutuksesta saatiin ohjelmisto, joka dynaamisesti säätelee lataustahtumaa kuormanhallinnan käskyjen mukaisesti. Ohjelmisto kykenee siis lukemaan eri

ohjausjärjestelmien viestejä, tulkitsemaan näitä ja tekemään näiden viestien mukaisia ohjaustoimia. Säädetäviä parametrejä ovat muun muassa lataus- ja purkuteho, jäähdytyksen/lämmityksen säätäminen ja latausaseman sähköajoneuvolle syöttämän tehon säätäminen. Säädettyjen parametrien lisäksi saadaan tietoa esimerkiksi akuston läpikulkevasta virrasta, varaustasosta ja jännitetasosta. Kuormanhallinnan toteuttama energiavaraston säätely hyödyntää luvun 5.3 kaltaisia algoritmeja, mutta niitä on jatkojalostettu järjestelmän kanssa yhteensopiviksi.

7.1.3 Akuston ja latausjärjestelmän integraatio

Päähuomio latausjärjestelmän ja akuston käytännön integraatiossa on sähköisten kytkentöjen tekemisessä latausjärjestelmässä käytettävän tehoelektronikan sekä akuston ja sen muiden sähköisten komponenttien välille. Tässä tapauksessa akusto on yhdistetty yhteiseen AC-kiskoon. Tähän AC-kiskoon on siis liitetty myös latausjärjestelmän tehoyksiköt, joten lisäkytkentöjä ei ole tarpeen tehdä. Latausjärjestelmän lataustapahtumaa voidaan tukea edellä kuvatun ohjelmiston avulla siten, että akustoa puretaan DC/DC- → DC/AC-suuntaajan kautta AC-kiskoon ja sitä kautta latausjärjestelmän kuormalle.

Latausjärjestelmän ja akuston välinen yhteistoiminta perustuu ohjelman avulla yhdistettäviin virtapiireihin. Ohjelman avulla suuntaajille kerrotaan, että latausjärjestelmä tarvitsee virtaa akustolta. Akuston tilan pohjalta ohjelmisto saa tiedon sallitusta akuston purkutehosta ja virrasta. Tämä purkuteho ja virran määrä annetaan suuntaajille, jotka suuntaavat sähköä. Suunnattu sähkö siirtyy yhteiseen AC-kiskoon, josta DC-teholähteet ottavat latausjärjestelmän syöttöön tarvitsemansa sähköä. Yhteisen AC-kiskon huonona puolena oli suuntaajien määrän lisääntyminen, joka näkyy käytännössä ohjattavuuden vaikeutumisena.

7.2 Havainnot ja huomiot toteutuksesta

Tähän lukuun on koostettu havaintoja ja kehitysehdotuksia liittyen toteutukseen. Havaittujen asioiden avulla pyritään kehittämään toteutusprosessia seuraavia projekteja varten. Toteutuksessa esiin nousseita asioita olivat jäähdytysjärjestelmän optimointi, johdotuksen tekemiseen liittyvät seikat sekä akkukontin tilan käytön optimointi sekä parantaminen.

Jäähdytyksen toteutuksen yhteydessä havaittiin, että hankittu järjestelmä saattaa olla liian järeä käyttötarkoitukseensa nähden. Vaikka akkujen optimaalisen käyttölämpötilan ylläpitäminen on tärkeä osa toimivaa kokonaisuutta, ei ole taloudellisesti eikä myöskään

teknisesti järkevää toteuttaa liian järeää jäähdytysratkaisua. Tämän takia onkin siis järkevää pohtia tarkemmin, onko jäähdytysratkaisu kustannuksiensa ja tehonsa puolesta hyvä ratkaisu nykyisellä toteutuksella. Pohdinnan avulla voidaan päättää mahdolliset muutokset jäähdytysjärjestelmään ja sen toteutukseen ennen seuraavia projekteja. Toisaalta jäähdytysjärjestelmän nykyinen mitoitus saattaisi mahdollistaa järjestelmän laajennuksen.

Huomiota kiinnitettiin myös johdotuksen tekemiseen. Johdotuksen tekemiseen tarvittavat komponenttistaukset saatiin suoraan akkujen valmistajalta. Johdotuksen komponentit ovat modulaarisia ja johtosarjan kasaaminen onnistuikin siis suhteellisen pienellä vaivalla. Heräsi kuitenkin kysymys olisiko johtosarjan itse tekemisen sijasta parempi ratkaisu tilata valmiin johtosarjan teettäminen joltakin johtosarjojen toimittajalta. Näin pystyttäisiin tehostamaan projektin läpivientin kuluvaa aikaa, sillä johtosarjojen tekeminen siirtyisi pois asentajilta. Tällä saavutettava ajallinen säästö olisi 3–10 työtuntia, mikä oli johtosarjan tekemiseen kulunut aika. Tällöin saavutettaisiin ajallisia säästöjä johtosarjan tekemisessä ja mahdollisesti johtosarjojen laatu olisi parempi. Vastapainona ajallisille säästöille on kuitenkin mietittävä johtosarjan kustannuksien nousua.

Muihin huomioihin lukeutuu se, että akkukontin tilojen käyttöä olisi mahdollista parantaa. Projektissa akustolle varattua tilaa ei käytetty kokonaisuudessaan, joten tilankäyttöä voitaisiin siis parantaa lisäämällä tilaan akkuja. Lisäksi tilankäyttöön vaikuttaa se, että projektissa käytetyt akut eivät kiinnityksensä vuoksi mahdollista esimerkiksi pinoamista kovin helposti. Korkeussuunnassa tilaa ei päästäisi siis muutenkaan hyödyntämään kokonaisuudessaan. Tämän ratkaisemiseksi olisi hyvä miettiä vaihtoehtoisia kiinnitysratkaisuja. Lisäksi jäähdytysratkaisun sijoittelua olisi mahdollisesti järkevä miettiä uudestaan. Jäähdytysratkaisun paremmalla sijoittelulla olisi mahdollista saada lisää tilaa akkuja varten.

Lisäksi projektin aikana tuli ilmi muita huomioita, jotka piti käsitellä projektin toteutuksen aikana. Näihin lukeutui esimerkiksi akkukontin rakenteisiin liittyvät muutostarpeet ja komponenttien sijoittelun muutokset suunnitellusta. Yleisellä tasolla akkujen integraatio laatusjärjestelmään onnistui ilman suurempia ongelmia. Toteutuksen aikana havaitut asiat liittyivät lähinnä toteutuksen läpiviennin tehostamiseen, mikä on arvokasta tietoa uusien projektien toteutusta ajatellen.

8. TULOKSIEN TARKASTELU

Seuraavaksi on hyvä tiivistää ja käydä läpi mitä työn tekemisellä saatiin selville ja mitä näiden tuloksien avulla voidaan päätellä. Työn tarkoituksena oli vastata luvussa 1 esitettyihin tutkimuskysymyksiin. Tässä esitetään kaikkien tutkimuskysymysten vastaukset yhteenvedona ja pohditaan kuhunkin kohtaan saadun vastauksen merkitystä.

Työ lähti liikkeelle siitä, että etsittiin erilaisia energiavarastoja, jotka sopisivat integroitavaksi sähköajoneuvojen latausratkaisuihin. Lukujen 2 ja 3 selvitysten perusteella sopivia ratkaisuja ovat vauhtipyörät, superkondensaattorit sekä akut. Akuista parhaiten sopivat litiumioniakut ja natriumrikkiakut. Litiumioniakuista parhaimpina vaihtoehtoina voidaan pitää NMC-, LFP- ja LFMP-teknologioihin pohjautuvia akkuja. Näistä vaihtoehdoista akut tarjoavat parhaat mahdollisuudet varastoida paljon energiaa, tarjoten kuitenkin vielä hyvän tehon. Superkondensaattorit ja vauhtipyörät taas ovat erityisen hyviä lyhyemmän aikavälin isoissa tehon tarpeissa, sillä niiden kyky varastoida energiaa ei ole yhtä hyvä kuin akustoilla. Tulevaisuudessa on järkevää kiinnittää huomiota luvussa 3.2.7 mainittuihin akkuteknologioihin. Näiden avulla pystyttiin muodostamaan kuva siitä, mitkä teknologiat ovat nyt järkeviä valintoja energiavaraston toteuttamiseen ja lisäksi tiedetään mitä teknologioita kannattaa pitää silmällä tulevaisuudessa. Oikeiden energiavarastojen valinta auttaa toteuttamaan projektin tehokkaasti, jotta valinta on suoraan mahdollisimman sopiva teknisesti sekä kustannuksien puolesta.

Investointien tekeminen vaatii aina hyvät perustelut, eikä energiavaraston toteuttaminen ole tästä poikkeus. Tämän takia energiavaraston toteuttaminen pitää pystyä perustelemaan sekä yritykselle että asiakkaalle. Perustelut voivat olla taloudellisia eli esimerkiksi tuottomahdollisuuksia tai sitten perustelut voivat olla erilaisia hyötyjä, joita sijoituksella voidaan saavuttaa. Taloudelliset perustelut ovat yksinkertaisia, sillä niiden arvo pystytään laskemaan. Kannattavuuslaskelma eri ansaintamahdollisuuksista on yksi tällainen taloudellinen perustelu. Lisäksi yksi mahdollinen taloudellinen perustelu on verrata energiavaraston rakentamiskustannusta liittymän vahvistamisen kustannuksiin, sillä energiavaraston avulla liittymää ei tarvitse välttämättä vahvistaa tai sen vahvistamista pystytään lykkäämään. Liittymän vahvistamisen kustannukset saadaan selville pyytämällä esimerkiksi tarjous liittymän vahvistamiseen liittyvän verkon rakennuskustannuksista. Kun on selvillä liittymän vahvistamisen hinta, voidaan vertailla energiavaraston kustannuksia vahvistamiseen liittyviin kustannuksiin. Hyötyjen perustelu on taas huomattavan hankalaa, sillä niitä pitää arvioida keinoilla, joita ei välttämättä voi suoraan mitata tai arvioida.

Esimerkiksi keskeytyksien välttämisen arvoa on vaikeaa arvioida suoraan jonkin yrityksen kohdalla, ja sen arvon pystyy määrittämään vain yritys itse.

Työn tekemisen avulla löydettiin energiavaraston integraatiosta seuraavia mahdollisuuksia, joita ovat keskeytymätön virransyöttö, varavoima, kuormien tasaaminen, jännitteen ja taajuuden säätö, kuormahuippujen tehon rajoittaminen, reservimarkkinoille osallistuminen ja uusiutuvien energianlähteiden integrointi. Näistä kuormien tasaaminen, reservimarkkinoille osallistuminen sekä kuormahuippujen tehon rajoittaminen ovat ansaintamahdollisuuksia sekä hyötyjä. Pelkkiä hyötyjä ovat keskeytymätön virransyöttö, varavoima ja uusiutuvien energianlähteiden integrointi. Näistä kaksi ensimmäistä saattaa tuoda epäsuoria ansaintamahdollisuuksia palvelujen keskeytyksien välttämisestä. Löydettyjä mahdollisuuksia on monta, ja näiden avulla investointia on hyvä lähteä perusteamaan. Selvittämällä huolellisesti eri hyödyt ja haitat sekä kustannukset, saadaan kaasan hyvät perustelut, joilla myydä tällaisia ratkaisua eri asiakkaille. Ilman huolellista taustatyötä, on tällaisen uuden ison investoinnin myyminen hankalaa.

Tutkimuskysymyksissä etsittiin myös vastausta sille, mikä on reunaehto energiavaraston toteuttamiselle. Reunaehto voi olla esimerkiksi akuston hinta yksikössä €/kWh tai sitten tiettyjen ominaisuuksien toteutus. Kun toimitetaan ratkaisua esimerkiksi yritykselle, se saattaa vaatia, että toimitettava ratkaisu maksaa itsensä takaisin esimerkiksi 5 % korolla. Tällöin tämä on reunaehto, joka Plugitin tarvitsee osoittaa mahdolliseksi toimitettavalla järjestelmälle. Tähän reunaehtoon pääsemistä voidaan arvioida hyödyntäen luvussa 5.3 tehtyjä laskelmia. Näiden laskelmien mukaisesti reunaehtoon päästään, jos akkujen hinnat putoavat lähelle 250 €/kWh tai jos energiavarastosta saadaan myös muuta hyötyä, jolle voidaan antaa rahallista arvoa.

Vaihtoehtoisesti yritys ilmoittaa tarvitsevansa tietyt ominaisuudet, jotka pitää toteuttaa. Näiden ominaisuuksien toteuttaminen on siinä tapauksessa reunaehto. Toisaalta järjestelmä saatetaan toimittaa Plugitin omaan taseeseen kirjattuna, jolloin asiakas maksaa järjestelmästä palveluna (CaaS). Tällöin tilanne on se, että Plugitin pitää veloittaa palvelusta tarpeeksi, jotta pystytään kattamaan investoinnin kustannukset. Palvelun hinnan määrittämisessä voidaan hyödyntää samoja laskelmia kuin edellä. Kustannusperustelut vaikuttavat merkittävästi investointipäätökseen, joten ilman niitä on vaikea lähteä edistämään projektia. Kustannuksien avulla pystytään lisäksi etukäteen arvioimaan investoinnin järkevyyttä lähitulevaisuudessa.

Näissä edellä mainituissa laskelmissa on kuitenkin otettava huomioon maailmantilanteesta johtunut sähkön hinnan poikkeuksellinen vaihtelu vuoden 2022 aikana, jolla voi

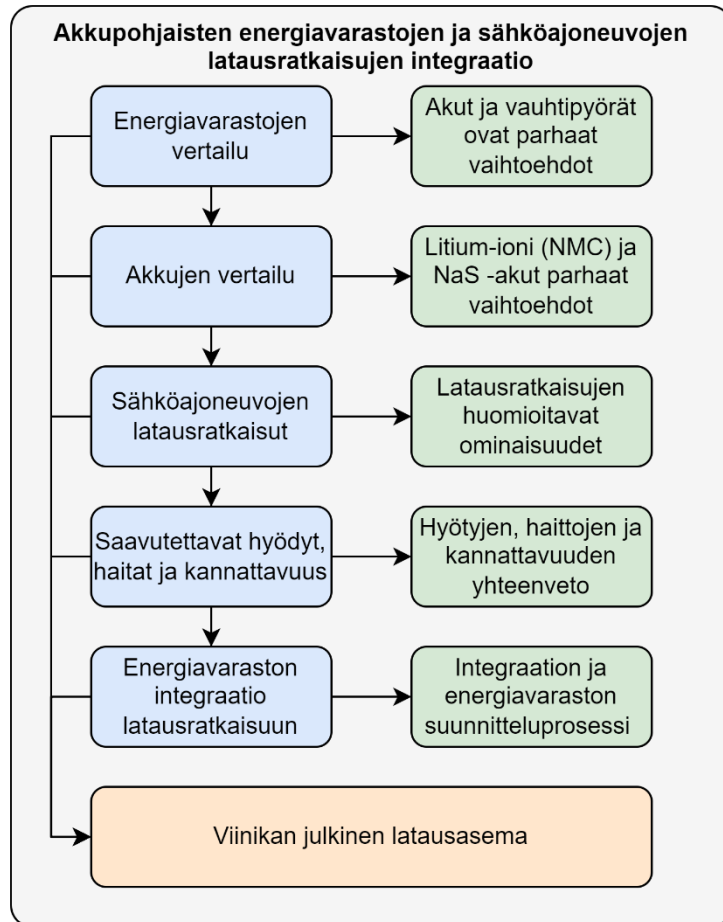
olla vaikutusta laskelmien tuloksiin. Laskelmat perustuvat enemmän hintapiikkeihin, joten on mahdollista, että vaikutus laskelmiin ei ole kovin suuri. Tämä olisi kuitenkin hyvä vielä tarkistaa tekemällä laskelmat toisen ajankohdan sähkön hintatiedoilla. Tätä ei kuitenkaan toteutettu tämän työn puitteissa, joten se olisi hyvä toteuttaa tämän työn jälkeen.

Energiavaraston toteuttamisen reunaehtoon pääsemiseen voidaan saada myös muuta tuloa, kuin luvussa 5.3 käsitellyissä ansaintamenetelmissä. Yksi tutkinnassa oleva ansaintamahdollisuus on reservimarkkinoille osallistuminen. Reservimarkkinoille osallistumista ei tutkittu tämän työn yhteydessä, sillä kyseisen näkökulman arvioiminen vaatii huolellisen katsauksen erinäisiin säädöksiin ja saavutettavien tuottojen kirjaamiseen. Tekemällä tästä oma erillinen työ, saadaan parempi kuva reservimarkkinoiden mahdollisuuksista ja siitä onko kyseessä kannattavampi ratkaisu kuin mitä tässä työssä on laskettu.

Käytännön integraatiosta esimerkkinä on projektin toteuttaminen. Tällä haettiin kokemuksia ja kartutettiin osaamista tällaisen kokonaisuuden toimittamisesta varten. Samalla kyettiin hakemaan kohtia, joita ei toteutuksen suunnittelussa osattu ottaa huomioon. Lisäksi toteutuksesta saatiin erinäisiä kokemuksia ja näistä pystyttiin koostamaan havainnot. Projektin toteutuksessa saatiin todistettua suunnittelun teoria oikeanlaiseksi ja päästiin käytännössä tekemään järjestelmä.

Työssä onnistuttiin reunaehtojen määrittelyssä ja työn avulla saatiin selville tarvittava tuoton määrä, jotta investointi olisi kannattava. Energiavaraston integraatiolla on mahdollista saada kohtuullista tuottoa, mutta tällä hetkellä jäädään kuitenkin vielä tappiolle akkujen ja muun tarvittavan teknologian hinnan takia. Lisäksi saatiin kasattua paljon erilaisia hyötyjä, joita voidaan tällaisella integraatiolla saavuttaa. Akkuteknologioiden kehitys sekä hintakehitys lähitulevaisuudessa tulee pääasiassa määräämään energiavaraston integraation menestymisen mahdollisuudet. Tulevaisuuden näkymät vastaaville ratkaisuille on lupaavat, mutta kannattavuuden tulisi kuitenkin olla parempi. Kustannuksien laskun kautta tulee energiavaraston integraatiosta houkuttelevampi vaihtoehto taloudellisesti. Pelkillä hyödyillä tällaista ratkaisua on vaikea myydä, ja hyötyjen tehtävä onkin auttaa parantamaan kannattavuutta tuomalla lisäarvoa. Toteutuksen kannalta kokonaisuus on siis merkittävämpi kuin kannattavuus tai hyödyt yksinään ja investoinnit tulevatkin pohjautumaan kannattavuuden sekä hyötyjen kokonaisuuteen. Reservimarkkinoiden vaikutus kannattavuuteen voi muuttaa tämän työn tuloksia huomattavasti parempaan suuntaan, jolloin energiavaraston integraatioon saattaa olla kannattavaa investoida jo nykyisillä akkujen hinnoilla.

Edellä mainitut asiat on tiivistetty yhteen kuvaan, jonka tarkoituksena on helpottaa työn sisällön tulkitsemista. Kuva 39 tiivistää työn eri vaiheet ja mitä näillä vaiheilla on saavutettu. Kuvassa mustat nuolet kuvastavat etenemistä ja sen suuntaa, siniset ruudut sisältävät eri vaiheet/luvut ja vihreällä on merkittynä vaiheen tekemisen aikana löydetty tiedot/tulokset.



Kuva 39. Työn vaiheet ja mitä tuloksia saatiin.

9. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin erinäisiä energiavarastoja ja niiden soveltuvuutta energiavarastojen ja latausratkaisujen integraatioon. Soveltuvuuden lisäksi käsiteltiin erilaisia hyötyjä ja haittoja, joita liittyy energiavaraston ja latausratkaisun integraatioon. Hyötyjen ja haittojen avulla kartoitettiin reunaehdot energiavaraston toteutukselle ja mahdolliset lisäarvot, joita asiakas/yritys toteutuksesta saa. Tarkoituksena oli muodostaa kokonaiskuva integraatioon liittyvästä prosessista ja avata tämä prosessi mahdollisimman yksiselitteiseen muotoon. Työn teoriaosio toteutettiin kirjallisuusselvityksenä, kun taas integraation käytännön toteutus konstruktivisella tutkimusotteella.

Työn alussa hankittiin tietoja erilaisista energiavarastoista ja niiden soveltuvuudesta energiavarastojen ja latausratkaisujen integraatioon. Syvällisempään tarkasteluun otettiin energiavarastojen tarkastelun pohjalta akkupohjaiset energiavarastot. Tällä tarkastellulla oli tarkoitus löytää akkupohjaisten energiavarastojen erikoispiirteet, eri akkuteknologiat ja näiden eri ominaisuudet. Samalla saatiin kartoitettua tulevaisuuden akkuteknologioita, joita kannattaa pitää silmällä tuotekehityksen kannalta. Näiden tietojen perusteella energiavarastoista sopivia ovat vauhtipyörät, superkondensaattorit ja akustot, sillä ne ovat skaalautuvia kokonsa puolesta, omaavat hyvät energia- ja tehotehiheydet sekä pystyvät reagoimaan nopeisiin tehonmuutoksiin. Lisäksi niiden ominaisenergian ja -tehon arvot ovat hyvät. Yksi tärkeimmistä kriteereistä sijoitettaessa energiavarastoa latausratkaisun yhteyteen on juuri tilavaatimus, joka on suoraan yhteydessä energia- ja tehotehiheyteen. Syvällisemmässä akustotarkastelussa vertailtiin eri akkuteknologioiden ominaisarvoja, joista parhaiten menestyivät Li-ion ja NaS. Näiden puolesta puhuivat hyvä elinikä sykleinä sekä hyvä energia- ja tehotehiheys, jotka mahdollistavat niiden sijoittamisen pienempään tilaan.

Käytännön energiavaraston ja latausratkaisun integraation toteuttamisen pohjustamiseksi haettiin tietoja sähköajoneuvojen latausratkaisuista. Perehtymällä latausratkaisuihin tarkemmin saatiin selville integraatioon vaikuttavia asioita, kuten ratkaisun toteuttamisen kannalta oleelliset topologiat ja tietoa siitä, minkälaista kommunikaatiota pitää hyödyntää. Näitä tietoja hyödynnettiin suunniteltaessa integraatiota ja energiavaraston ohjauksessa tarvittavaa ohjelmistoa.

Integraatioon liittyviä hyötyjä ja haittoja sekä kannattavuuteen liittyviä tietoja hakemalla pyrittiin kartoittamaan perustelut asiakkaalle ja yritykselle investoinnin kannattavuudesta.

Kannattavuuteen liittyviä tuottomahdollisuuksia löydettiin eri lähteistä. Näitä tuottomahdollisuuksia hyödyntämällä tehtiin käytännön dataa hyödyntäviä laskelmia konstruktiivisella tutkimusotteella. Saatuja tuloksia laskelmista verrattiin investoinnin suuruuteen, jotta saatiin kuva kannattavuudesta. Laskelmien pohjalta tuli selkeästi esiin se, että nykyisillä akustojen hinnoilla kaikki läpikäytyt suorat tuottomahdollisuudet ovat tappiollisia. Tässä on kuitenkin hyvä huomioida se, että akkujen hintojen on ennustettu laskevan. Hintojen lasku tulee tukemaan energiavarastojen käyttöönottoa tulevaisuudessa, sillä tuottomahdollisuuksien kannattavuus paranee. Suorat tuottomahdollisuudet eivät kuitenkaan kerro koko tarinaa investoinnin kannattavuudesta, sillä osalle hyödyistä voi olla asiakkaalle arvoa, jota ei pystytä suoraan arvioimaan tämän työn puitteissa. Esimerkiksi keskeytyksien ennaltaehkäisy arvo saattaa olla jollekin logistiikkayritykselle todella suuri tai sitten esimerkiksi vihreän siirtymän edistämiseen liittyvät toimenpiteet ovat edellytys uusien sopimuksien tekemisessä.

Työn lopuksi tehtiin käytännön integraatio, joka toteutettiin toteutus-/suunnitteluprojektina. Suunnittelun avuksi määriteltiin suunnitteluprosessi energiavaraston ja integraation suunnittelulle sisältäen integraation etenemiseen liittyvät vaiheet ja tarvittavat lähtötiedot, joilla eri järjestelmät voidaan suunnitella. Lisäksi tarkoituksena oli dokumentoida huomioitavat asiat integraatiossa ja dokumentoida prosessi, jolla integraatio tehtiin alusta loppuun. Integraation aikana ilmenneet havainnot dokumentoitiin erikseen omaan alalukuunsa sekä pohdittiin näiden vaikutuksia ja ratkaisuja. Samalla mietittiin, tarvitseeko tulevaisuudessa muissa projekteissa ottaa huomioon ilmenneitä asioita ja tarvitseeko niihin reagoida jotenkin.

Työllä oli kaksi tavoitetta, jotka olivat energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation mahdollistaminen sekä kyseisen integraation kannattavuuden ja hyötyjen arviointi. Integraation mahdollistaminen voidaan katsoa onnistuneeksi, sillä projektin toteutuksessa onnistuttiin hyödyntämällä tutkimuksen tuloksia. Hyötyjen arvioinnissa onnistuttiin hyvin, sillä integraation toteuttamisesta saavutettavia eri mahdollisuuksia pystyttiin listaamaan ja niiden tuomat hyödyt saatiin eriteltyä ymmärrettävään ja tiiviiseen kuvaajaan. Näitä löydettyjä hyötyjä voidaan jatkossa käyttää energiavarastojen myynnissä asiakkaille. Kannattavuuden arvioinnissa onnistuttiin myös hyvin, sillä eri laskelmien kautta saatiin selville tuottomahdollisuuksien olevan tappiollisia nykyisillä akustojen hinnoilla. Tulevaisuuden akustojen hintojen lasku tuo kuitenkin mahdollisuuden tuotolle sekä lisäksi on huomioitava eri hyötyjen tuoma lisäarvo asiakkaalle. Hyötyjen tuoman arvon selvittäminen vaatii kuitenkin tapauskohtaista arviointia.

Työhön pohjautuvat jatkotutkimukset voidaan tiivistää kahteen osa-alueeseen. Ensimmäinen näistä on reservimarkkinoiden vaikutus integraation kannattavuuteen. Toinen on

tulevaisuuden akkuteknologioiden kehityksen jatkuva seuranta sekä akkujen hintakehityksen tarkkailu. Näiden avulla pystytään arvioimaan paremmin integraation menestymisen mahdollisuuksia lähitulevaisuudessa ja mahdollisesti myös pidemmällä aikavälillä.

Koko työn tulokset ja yhteenveto on koottu taulukkoon 13. Taulukkoon on eritelty päätaivoitteet, tutkimuksen kohteet, havainnot, muut huomioitavat asiat sekä tulos. Lisäksi tärkeimmät hyödyt ja haitat on koottu taulukkoon. Aivan taulukon lopussa on esitetty työn tiivistetty yhteenveto.

Taulukko 13. *Työn yhteenvetotaulukko.*

Tavoite	Energiavarastojen ja latausratkaisujen integraatio.
Tutkimuksen kohteet	Energiavarastot, akustot ja näiden integrointi.
Havainnot	Akustot (Li-ion (NMC, LFMP, LFP), NaS) ja vauhti-pyörät parhaat vaihtoehdot.
Huomioitavat asiat	Suunnittelun periaatteet, Kuva 36.
Tulos	Prosessi, jonka avulla voidaan toteuttaa integraatio.
Tavoite	Energiavarastojen ja latausratkaisujen integraation toteuttamisen kannattavuuden ja hyötyjen arviointi.
Tutkimuksen kohteet	Energiavarastojen ja latausratkaisujen yhteiskäyttö.
Havainnot	Suorina tuottoina energiavarastojen integraatio ei ole kannattavaa.
Hyödyt	Tuottojen saaminen, tehorajoitusten ohittaminen, varavoima/UPS.
Haitat	Investointikustannukset, turvallisuus, ympäristöky-symykset.
Huomioitavat asiat	Investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa myös asiak-kaan antama arvo ratkaisun tuomille hyödyille.
Tulos	Laskelmat kannattavuudesta eri menetelmillä.
Yhteenveto	Energiavarastojen ja latausratkaisun integraatio on mahdollista toteuttaa usealla eri tavalla ja investoinnin kannattavuuden arviointi vaatii aina tapauskoh-taisen tarkastelun. Reservimarkkinoiden vaikutus tarvitsee tarkastella erikseen.

LÄHTEET

- [1] T. Simolin, Electric Vehicle Charging Load Management, dissertation, Tampere University, Publication 642, 2022, 234 p., Saatavissa: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-2505-3>
- [2] M. Gjelaj, S. Hasfemi, C. Traeholt, P. B. Andersen, Grid integration of DC fast-charging stations for EVs by using modular li-ion batteries, IET generation, transmission & distribution, Vol. 12, 2018, pp. 4368–4376.
- [3] Tietoa meistä, Plugit Finland Oy, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 10.3.2023): <https://plugit.fi/yritys/>
- [4] J.-M. Tarascon, P. Simon, Electrochemical Energy Storage, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2015, 96 p.
- [5] R. A. Huggins, Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications, 2. edition, Springer, Stanford, USA, 2016, 540 p.
- [6] A. Rufer, Energy storage: systems and components, 1. edition, CRC Press, Boca Raton, USA, 2018, 274 p.
- [7] R. Zito, H. Ardebilli, Energy storage: new approach, 2. edition, John Wiley & Sons, Hoboken, USA, 2019, 348 p.
- [8] R. Amirante, Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies, Energy Conversion and Management, Vol. 132, 2017, pp. 327–387.
- [9] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, Energy storage in power systems, John Wiley & Sons, Chichester, United Kingdom, 2016, 289 p.
- [10] M. A. Hannan, S. B. Wali, P. J. Ker, M. S. Abd Rahman, M. Mansor, V. K. Ramachandaramurthy, K. M. Muttaqi, T. M. I. Mahlia, Z. Y. Dong, Battery energy-storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches, and outstanding issues, Journal of Energy Storage, Vol. 42, 2021, p. 103023.
- [11] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, D. Habibi, Overview of energy storage systems in distribution networks: Placement, sizing, operation, and power quality, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 91, 2018, pp. 1205–1230.
- [12] D. Sbordone, I. Bertini, B. Di Pietra, M. C. Falvo, A. Genovese, L. Martirano, EV fast charging stations and energy storage technologies: A real implementation in the smart micro grid paradigm, Electric Power Systems Research, Vol. 120, 2015, pp. 96–108.
- [13] Z. Šimić, D. Topić, G. Knežević, D. Pelin, Battery energy storage technologies overview, International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems, Vol. 12, 2021, pp. 53–65.

- [14] M. T. Lawder, B. Suthar, P. W. C. Northrop, S. De, C. M. Hoff, O. Leitermann, M. L. Crow, S. Santhanagopalan, V. R. Subramanian, Battery Energy Storage Systems (BESS) and Battery Management System (BMS) for Grid-Scale Applications, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, 2014, pp. 1014–1030.
- [15] M. Mahesh, D. V. Bhaskar, R. K. Jisha, R. Krisha, R. Gnanadass, Lifetime estimation of grid connected LiFePO₄ energy storage systems, *Electrical engineering*, Vol. 104, 2022, pp. 67–81.
- [16] M. M. Rahman, A. O. Oni, E. Gemechu, A. Kumar, Assessment of energy storage technologies: A review, *Energy Conversion and Management*, Vol. 223, 2020, p. 113295.
- [17] K. Mongrid, V. Viswanathan, P. Balducci, J. Alam, V. Fotedar, V. Koritarov, B. Hadjerioua, Energy Storage Technology and Cost Characterization Report, U.S. Department of Energy, 2019, p. 120, Saatavissa (viitattu 20.3.2023): <https://doi.org/10.2172/1573487>
- [18] S. K. Fayegh, M. A. Rosen, A review of energy storage types, applications and recent developments, *Journal of Energy Storage*, Vol. 27, 2020, p. 101047.
- [19] W. Xing, L. Yun, Analysis of Energy Storage Technology and Their Application for Micro Grid, *Proceedings of the International Conference on Computer Technology, Electronics and Communication (ICCTEC)*, 2017, pp. 972–975.
- [20] D. Pavlov, *Lead-acid batteries : science and technology : a handbook of lead-acid battery technology and its influence on the product*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 2017, 722 p.
- [21] U. Salman, S. Belaish, Z. Ji, D. Huang, N. Zheng, B. Xu, Comparing the economic value of lithium-ion battery technologies in the nine wholesale electricity markets in North America, *iEnergy*, Vol. 1, 2022, pp. 363–373.
- [22] S. Leuthner, Lithium-ion battery overview. In: R. Korthauer (ed.), *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Springer, Berlin, Germany, 2018, pp. 13–19.
- [23] K. Vuorilehto, Materials and fuction. In: R. Korthauer (ed.), *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Springer, Berlin, Germany, 2018, pp. 21–28.
- [24] C. Graf, Cathode materials for lithium-ion batteries. In: R. Korthauer (ed.), *Lithium-Ion Batteries: Basics and Applications*, Springer, Berlin, Germany, 2018, pp. 29–41.
- [25] Z. Zhu, T. Jiang, M. Ali, Y. Meng, Y. Jin, Y. Cui, W. Chen, Rechargeable Batteries for Grid Scale Energy Storage, *Chemical reviews*, Vol. 122, 2022, pp. 16610-16751.
- [26] Y. Wu, *Lithium-ion batteries : fundamentals and applications*, CRC Press, Boca Raton, USA, 2015, 574 p.
- [27] C. Graf, Cathode materials for lithium-ion batteries. In: *Lithium-ion Batteries: Basics and Applications*, Springer, Berlin, Germany, 2018, pp. 29–41.
- [28] I. S. Bayram, A. Tajer, *Plug-In Electric Vehicle Grid Integration*, Artech House, Norwood, USA, 2017, 285 p.

- [29] ST-käsikirja 41: Sähköajoneuvot ja latausjärjestelmät, Sähkötieto ry, Espoo, 2022, 150 s.
- [30] A. Rachid, H. El Fadil, K. Gaouzi, K. Rachid, A. Lassioui, Z. El Idrissi, M. Koundi, Electric Vehicle Charging Systems: Comprehensive Review, Energies (Basel), Vol. 16, Iss. 1, 255 p.
- [31] Electric vehicle conductive charging system – Part 1: General requirements, Finnish Standards Association, SFS-EN IEC 61851-1:2019, Helsinki, 154 p.
- [32] Road vehicles. Vehicle to grid communication interface. Part 1: General information and use-case definition, Finnish Standards Association, SFS-EN ISO 15118-1:2019, Helsinki, 133 p.
- [33] S. Ghosh, A. K. Singh, R. Maurya, S. N. Singh, V. G. Agelidis, Charging stations and standards. In: R. Singh, S. Padmanaban, S. Dwivedi, M. Molinas, F. Blaabjerg, Cable Based and Wireless Charging Systems for Electric Vehicles, The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2021, 31 p.
- [34] Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets. Conductive charging of electric vehicles. Part 2: Dimensional compatibility requirements for AC pin and contact-tube accessories, Finnish Standards Association, SFS-EN IEC 62196-2:2022 en, Helsinki, 77 p.
- [35] Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets. Conductive charging of electric vehicles. Part 3: Dimensional compatibility requirements for DC and AC/DC pin and contact-tube vehicle couplers, Finnish Standards Association, SFS-EN IEC 62196-3:2022 en, Helsinki, 77 p.
- [36] Communication Protocols, Vector Informatik GmbH, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 29.3.2023): <https://www.vector.com/se/en/know-how/smart-charging/communication-protocols/#>
- [37] K. Chamberlain, S. Al-Majeed, Standardisation of UK Electric Vehicle Charging Protocol, Payment and Charge Point Connection, World Electric Vehicle Journal, Vol. 12, Iss. 2, 2021, 33 p.
- [38] Protocols, Open Charge Alliance, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 28.3.2023): <https://www.openchargealliance.org/protocols/>
- [39] S. Hsaini, M. Ghogho, M. E. H. Charaf, An OCPP-Based Approach for Electric Vehicle Charging Management, Energies, Vol. 15, 2022, p. 6735.
- [40] M. U. Mutarraf, Y. Guan, L. Xu, C. L. Su, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, Electric cars, ships, and their charging infrastructure – A comprehensive review, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 52, Part B, 2022, p. 102177.
- [41] S. Hemavathi, A. Shinisha, A study on trends and developments in electric vehicle charging technologies, Journal of Energy Storage, Vol. 52, Part C, 2022, p. 105013.
- [42] M. S. Alam, M. Krishnamurthy, Electric vehicle integration in a smart microgrid environment, CRC Press, Boca Raton, USA, 2021, 361 p.

- [43] D. D. Simone, L. Piegari, Integration of Stationary Batteries for Fast Charge EV Charging Stations, *Energies*, Vol. 12, Iss. 24, 2019, p. 4638.
- [44] S. Srdjan, L. Srdjan, Toward Extreme Fast Charging: Challenges and Opportunities in Directly Connecting to Medium-Voltage Line, *IEEE electrification magazine*, Vol. 7, 2019, pp. 22–31.
- [45] ST-käsikirja 55: Akkuteknologiaan perustuvat energiavarastot, Sähkötieto ry, Espoo, 2023, 13 s.
- [46] M. R. Sarker, H. Pandžić, K. Sun, M. A. Ortega-Vazquez, Optimal operation of aggregated electric vehicle charging stations coupled with energy storage, *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 12, Iss. 5, 2018, pp. 1127–1136.
- [47] A. Khalid, A. Stevenson, A. I. Sarwat, Overview of Technical Specifications for Grid-Connected Microgrid Battery Energy Storage Systems, *IEEE Access*, Vol. 9, 2021, p. 163554.
- [48] C. Jin, J. Tang, P. Ghosh, Optimizing Electric Vehicle Charging With Energy Storage in the Electricity Market, *IEEE Transactions on Smart Grids*, Vol. 4, 2013, pp. 311–320.
- [49] N. Sockeel, J. Gafford, M. Manjrekar, M. Mazzola, Economic Analysis of High-Longevity Battery Capacity Fades for Electric Vehicles Supercharger Buffering Application, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 6, 2020, pp. 995–1002.
- [50] D. Kucevic, S. Englberger, A. Sharma, A. Trivedi, B. Tepe, B. Schachler, H. Hesse, D. Srinivasan, A. Jossen, Reducing grid peak load through the coordinated control of battery energy storage systems located at electric vehicle charging parks, *Applied Energy*, Vol. 295, 2021, p. 116936.
- [51] H. Ding, Z. Hu, Y. Song, Value of the energy storage system in an electric bus fast charging station, *Applied Energy*, Vol. 157, pp. 630–639.
- [52] T. Simolin, A. Rautiainen, J. Koskela, P. Järventausta, Control of EV charging and BESS to reduce peak powers in domestic real estate, *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, Vol. 14, No. 1, 2019, pp. 1–7.
- [53] Reservimarkkinat, Fingrid Oy, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 4.4.2023): <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>
- [54] J. Vyyryläinen, Toimitusvarmuus ja toimituskyky: tilaukset ajallaan vai ei-oota?, Metsys Oy, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 22.6.2023): <https://metsys.fi/toimitusvarmuus/>
- [55] Pörssisähkön spot-hinta Suomessa, sahko.tk, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 18.4.2023): <https://sahko.tk/?vat0=true>
- [56] Energiakriisi ja nopea inflaatio synkensivät Suomen talousennusteita vuonna 2022, Suomen Pankki, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 18.4.2023): <https://vuosikertomus.suomenpankki.fi/2022/toimintakertomus/vuorovaikutus-ja-yhteisty/energiakriisi-ja-nopea-inflaatio-synkensivat-suomen-talousennusteita-vuonna-2022/>

- [57] Sähkö oli kuluneena vuonna kalleinta koskaan, mutta arvio vuoden 2023 sähkön hinnoista on rohkaisevaa, YLE, verkkoartikkeli, Saatavissa (viitattu 18.4.2023): <https://yle.fi/a/74-20010859>
- [58] Verkkopalveluhinnasto, Tampereen Sähköverkko Oy, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 12.4.2023): https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkoverkko/hinnastot-ja-sopimusehdot/2017-10-01---verkkopalveluhinnasto---kaikki-tuotteet_päivitys-2020-12-31.pdf
- [59] DC chargers, Charging shop EU, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 13.4.2023): <https://chargingshop.eu/fi/tuote-osasto/dc-chargers-fi/>
- [60] A. Hussain, V.-H. Bui, H.-M. Kim, Optimal Sizing of Battery Energy Storage System in a Fast EV Charging Station Considering Power Outages, IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 6, 2020, pp. 453–463.
- [61] S. Negarestani, M. Fotufi-Firuzabad, M. Rastegar, A. Rajabi-Ghahnavieh, Optimal Sizing of Storage System in a Fast Charging Station for Plug-in Hybrid Electric Vehicles, IEEE Transactions on Transportation Electrification, Vol. 2, 2016, pp. 443–453.
- [62] S. Englberger, A. Jossen, H. Hesse, Unlocking the Potential of Battery Storage with the Dynamic Stacking of Multiple Applications, Cell Reports Physical Science, Vol. 1, 2020, 16 p.
- [63] Investointien suunnittelu ja seuranta -ohje, Valtiokonttori, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 18.4.2023): <https://www.valtiokonttori.fi/maaraykset-ja-ohjeet/investointien-suunnittelu-ja-seuranta-ohje-2/>
- [64] S. Lepszy, Analysis of the storage capacity and charging and discharging power in energy storage systems based on historical data on the day-ahead energy market in Poland, Energy (Oxford), Vol. 213, 2020, p. 118815.
- [65] Y. Bo, W. Junting, C. Yixuan, L. Danyang, Z. Chunyuan, C. Yijun, G. Zhengxun, S. Hongchun, Z. Xiaoshan, Y. Tao, S. Liming, Optimal sizing and placement of energy storage system in power grids: A state-of-the-art one-stop handbook, Journal of energy storage, Vol. 32, 2020, p. 101814.
- [66] Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 1: Yleiset vaatimukset, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, SFS-EN IEC 62485-1:2018, Helsinki, 42 s.
- [67] Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 5: Litiumionipaikallissakkujen turvallinen käyttö, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, SFS-EN IEC 62485-5:2021, Helsinki, 77 s.
- [68] ST-kortisto 52.30.01: Akkuhuoneet ja varaamotilat, Sähkötieto ry, Espoo, 2022, 5 s.
- [69] ST-kortisto 52.30.02: Akustot ja varaajat. Valinta ja mitoittaminen, Sähkötieto ry, Espoo, 2016, 3 s.
- [70] ST-kortisto 52.30.03: Akuston asennus ja käyttöönotto, Sähkötieto ry, Espoo, 2016, 2 s.

- [71] Pienjännitesähköasennukset., Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, SFS 600-1:2022, Helsinki, 686 s.
- [72] Graphical symbols -Safety colours and safety signs – Registered safety signs, International Organization for Standardization, ISO 7010:2019, Geneva, 298 p.
- [73] Plugit rakentaa Suomen ensimmäisen sähköisen ammattiliikenteen julkisen latausaseman Tampereelle, Plugit Finland Oy, verkkosivu, Saatavissa (viitattu 15.8.2023): <https://plugit.fi/ajankohtaista/plugit-rakentaa-suomen-ensimmaisen-sahkoisen-ammattiliikenteen-julkisen-latausaseman-tampereelle/>

LIITE A: LASKENNASSA KÄYTETTY MATLAB OHJELMISTOKOODI

```

% Battery profit calculator - part of Master's Thesis
% Author: Sami-Aleksi Korhonen

data = importdata("Diplomityö\Kuvaajat\Sähköhintat18.4.22-18.4.23.xlsx");
price = data.data(2:8785,4);

% Get datetime exported from data in specified InputFormat
date = datetime(data.textdata(2:8785,6), 'InputFormat', 'dd/MM/yyyy
HH.mm.ss');
time(1:8784,1) = date.Hour; % Convert the wanted data
time(1:8784,2) = date.Month; % Convert the wanted data

% This is used to correct format errors that occurred daily at time 00:00
for i = 1:8784
    if isnan(time(i,1))
        time(i,1) = 0;
    end
end

time_price = [time(1:8784,1) price];
price_sum = zeros(24,1);

% Plot the years average spot price per hour
for i = 1:8784
    for j = 1:24
        if time_price(i,1) == j-1
            price_sum(j,1) = price_sum(j,1) + time_price(i,2);
        end
    end
end
price_avg = price_sum/(8784/24);
plot(0:1:23,price_avg)

% Example 1 - price limit - Master's Thesis chapter 5.3.1

% This is the price limit that defines charging and discharging during
the day
price_limit_max = 10;

ess_capacity = 188; % 2*94 kWh -modules
soc_limit = 0.7; % 20-90 % SoC utilization of ESS

% These define the amount of charging and discharging power the ESS has.
discharge_power = 100;
charging_power = 100;

```



```

% The efficiency of the charging/discharging event
efficiency = 0.9;

% These initialize the variables used to store graph values
ess_soc_graph = zeros(86400,1);
load_profile_year = zeros(24*60*365,1);
grid_power_year = zeros(24*60*365,1);
ess_soc_graph_year = zeros(24*60*365,1);
ess_power_graph = zeros(24*60*365,1);
energy_price_ess_year = zeros(24*60*365,1);
energy_price_grid_year = zeros(24*60*365,1);

% This is the ESS starting SoC
ess_soc = 0.2*ess_capacity;

% This creates and plots the load profile for the year using real world
charging data.
for i = 0:364
    load_profile_year(((1+(0*60)+(i*24*60)):((i*24*60)+(0*60)+60),1) =
141.92;
    load_profile_year(((10*60)+(i*24*60)):((i*24*60)+(10*60)+60),1) =
144.72;
    load_profile_year(((12*60)+(i*24*60)):((i*24*60)+(12*60)+60),1) =
144.29;
    load_profile_year(((17*60)+(i*24*60)):((i*24*60)+(17*60)+60),1) =
143.87;
    load_profile_year(((20*60)+(i*24*60)):((i*24*60)+(20*60)+60),1) =
147.47;
    load_profile_year(((22*60)+(i*24*60)):((i*24*60)+(22*60)+60),1) =
151.09;
    load_profile_year(((23*60)+(i*24*60)):((i*24*60)+(23*60)+60),1) =
112.09;
end
plot(1:1:24*60*365,load_profile_year)

% This extends the price data to minute accuracy
price_minutes = zeros(24*60*365,1);

for k = 0:364
    for i = 0:23
        for j = 1:60
            price_minutes((i*60+j+24*k*60),1) = price(k*24+i+1,1);
        end
    end
end

plot(1:1:525600,price_minutes)

```

```

% The main algorithm is here
for i = 1:525600

    % Price is higher than threshold -> Discharging
    if price_minutes(i,1) > price_limit_max

        % Check the SoC against capacity limits, if there is enough
        % SoC -> Discharge ESS
        if ess_soc > ess_capacity * 0.2

            % Check if there is load active -> Discharge
            if load_profile_year(i,1) > 0
                % Calculate the SoC value of the ESS
                ess_soc = ess_soc - (discharge_power/60);

                % Store current power the ESS is taking to graph
                ess_power_graph(i,1) = discharge_power;

                % Store current ESS SoC to graph
                ess_soc_graph_year(i,1) = ess_soc;

                % Power taken from grid
                grid_power_year(i,1) = load_profile_year(i,1) - dis-
charge_power;

            % No load -> no Discharge
            else
                % Store current ESS SoC to graph
                ess_soc_graph_year(i,1) = ess_soc;

                % Power taken from grid
                grid_power_year(i,1) = load_profile_year(i,1);
            end

        % Not enough SoC to Discharge ESS
        else
            % Store current ESS SoC to graph
            ess_soc_graph_year(i,1) = ess_soc;

            % Power taken from grid
            grid_power_year(i,1) = load_profile_year(i,1);
        end

    %Price is lower than threshold -> Charging
    elseif price_minutes(i,1) <= price_limit_max

        % Check the SoC against capacity limits, if there is capacity
        % to charge -> Charging
        if ess_soc < ess_capacity * 0.9

            % No load -> Charging

```

```

    if load_profile_year(i,1) == 0
        % Calculate the SoC value of the ESS
        ess_soc = ess_soc + (charging_power/60);

        % Store current power the ESS is taking to graph
        ess_power_graph(i,1) = -charging_power;

        % Store current ESS SoC to graph
        ess_soc_graph_year(i,1) = ess_soc;

        % Power taken from grid
        grid_power_year(i,1) = charging_power;

    % Load active -> no Charging
    else
        % Store current ESS SoC to graph
        ess_soc_graph_year(i,1) = ess_soc;

        % Power taken from grid
        grid_power_year(i,1) = load_profile_year(i,1);
    end

    % ESS SoC is at maximum capacity already, no Charging
    else
        % Store current ESS SoC to graph
        ess_soc_graph_year(i,1) = ess_soc;

        % Power taken from grid
        grid_power_year(i,1) = load_profile_year(i,1);
    end
end
end

plot(1:1:525600,ess_power_graph)
plot(1:1:525600,ess_soc_graph_year)
plot(1:1:525600,grid_power_year)

% Sum the electricity cost of load profiles with and without ESS
for i = 1:525600
    energy_price_grid_year(i,1) = price_minutes(i,1) * load_profile_year(i,1);
    energy_price_ess_year(i,1) = price_minutes(i,1) *
    grid_power_year(i,1);
end

% Price of electricity bought with ESS
ess_cost = (sum(energy_price_ess_year)/60)/100

% Price of electricity bought without ESS
grid_cost = (sum(energy_price_grid_year)/60)/100

```

```
% The profit gained compared to solution without ESS
diff = grid_cost-ess_cost;

sum(min(ess_soc_graph_year))
sum(max(ess_soc_graph_year))
sum(ess_soc_graph_year)/525600 % Average SoC over the year

% pks is the number of high peaks in the ESS SoC over the year
[pks, locs] = findpeaks(ess_soc_graph_year);

% Invert the graph so the function can find low peaks.
inverted_ess_soc_graph_year = -ess_soc_graph_year;

% pksmín is the number of low peaks in the ESS SoC over the year
[pksmín, locsmín] = findpeaks(inverted_ess_soc_graph_year);
```