

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2022

Tommi Porko

Energiavaraston hyödyntäminen sähkölatausjärjestelmissä



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2022 | 48 sivua

Tommi Porko

Energiavaraston hyödyntäminen sähkölatausjärjestelmissä

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia energiavaraston hyödyntämismahdollisuutta sähkölatausjärjestelmissä. Työ selvittää kuinka kustannuskannattavaa sähkölatausasemalle on huipputehon leikkaaminen sekä sähkönkulutuksen alentaminen energiavarastolla. Työn toimeksiantajana toimii Kempower oyj, jonka kautta työtä varten on saatu aineistoa latausaseman energiankulutusta varten.

Työn tavoitetta on lähdetty selvittämään tutkimalla aiheeseen liittyvää tutkittua tietoa, josta on muodostettu työtä varten teoriapohja ja laskentaan vaadittavat arvot. Työssä tarkasteltiin latausaseman sähkökustannuksia kolmen eri sähköverkkoyhtiön palveluhinnaston perusteella. Aineistosta lasketut tulokset havainnollistettiin taulukkoon, joista muodostettiin työn tavoitetta varten päätelmät energiavaraston kannattavuudesta.

Työssä huomattiin energiavaraston kapasiteetin ja latausaseman sähkönkulutuksen vaihtelun vaikuttavan suuresti energiavaraston kannattavuuteen. Suuren kapasiteetin akkuvarasto toi hyötyjä vasta pitkällä aikavälillä. Energiavaraston kannattavuuteen vaikuttaa varaston koko suuren kustannuksien vuoksi, pitkä käyttöikä, sähkönkulutuksen mahdollisimman suuri vaihtelu sekä sähköverkkoyhtiön korkea tehomaksun hinta. Energiavaraston voidaan kuitenkin todeta olevan vielä liian kallis, jotta se toisi suuria kustannushyötyjä.

Asiasanat:

Energiavarasto, akku, sähkölatausasema, huipputeho

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and environmental engineering

2022 | 48 pages

Tommi Porko

Utilization of energy storage in electric charging systems

The aim of this bachelor's thesis was to research possibilities to use energy storage in electric charging systems and find out how cost-effective it is for an electric charging station to cut peak power and reduce electricity consumption with an energy storage. The commissioner of this thesis was Kempower Oyj. The data of charging station energy consumption was obtained from the company.

To reach the outcome of the research, existing studies of the topic were reviewed. These formed the theoretical basis for the work. Values required for the cost-benefit calculation were obtained from the formed theoretical basis. In the work the cost of energy consumption of the charging station was examined with and without energy storage. Electricity distribution tariffs of three electricity distribution companies were included in the calculations. The results were illustrated in a table, from which conclusions about the profitability of the energy storage were formed for the purpose of the work.

The capacity of the energy storage and the fluctuation of electricity consumption in the charging station were observed to greatly affect the profitability of the battery storage system. The large-capacity battery storage brought benefits only in the long term. The profitability of the energy storage is affected by the size of the storage due to high cost, long service life, fluctuating power consumption as well as the electricity grid company's high power fee price. However, it can be stated that energy storage is still too expensive to bring significant cost benefits.

Keywords: Energy storage, battery, charging station, peak power

Sisältö

Käytetyt lyhenteet	6
1 Johdanto	7
2 Energiavarasto	9
2.1 Akun rakenne ja toimintaperiaate	9
2.1.1 Akun lataus	11
2.1.2 Akun varaustilan määrittäminen	12
3 Akkutyypit ja niiden jaottelu	15
3.1 Lyijyakku	16
3.2 Nikkelikadmiumakku	16
3.3 Litiumioniakku	16
3.4 Akun kustannukset	21
4 Sähkölatausjärjestelmä	23
4.1 Lataustavat	23
4.2 Latausaseman suunnittelu	24
4.3 Dynaaminen tehojako	25
5 Energiavarasto latausjärjestelmässä	26
5.1 Miten energiavarasto tulisi olemaan osa sähkölatausjärjestelmää	27
5.2 Tutkimusmenetelmien esittely	28
6 Sähkönhinnan muodostuminen	30
6.1.1 Laskentamallin muodostaminen	31
7 Tulokset	34
7.1 Sähköenergian kulutuksesta saatu hyöty	34
7.2 Aineiston tarkastelu	34
8 Yhteenveto	40

8.1 Tutkimuksen luotettavuus	41
8.2 Mahdolliset jatkotutkimusaiheet	42
Lähteet	43

Kuvat

Kuva 1 Eri akkutyyppeiden energia-arvoja y-akselilla ominaisenergia ja x-akselilla energiatiheys. (mpoweruk.com 2005b.)	15
Kuva 2 Litiumkoolttioksidin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)	17
Kuva 3 Litiumnikkelimangaanikoolttioksidin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)	18
Kuva 4 Litiummangaanioksidin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)	19
Kuva 5 Litiumrautafosfaatin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)	19
Kuva 6 Litiumnikkelikoolttialumiinioksidin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)	20
Kuva 7 Latausjärjestelmä	24
Kuva 8 Datasta muodostettu kaavio 100kW latausasemasta	36
Kuva 9 Datasta muodostettu kaavio 300kW latausasemasta	37
Kuva 10 Datasta muodostettu kaavio 450kW latausasemasta	38

Taulukot

Taulukko 1 Yhteenveto litiumakuista	21
Taulukko 2 Verkkoyhtiöiden verkkopalvelumaksut	32
Taulukko 3 Latausasema teholtaan 100kW	36
Taulukko 4 Latausasema teholtaan 300kW	38
Taulukko 5 Latausasema teholtaan 450kW	39

Käytetyt lyhenteet

DOD	Depth of discharge
kW	Kilowatti
LCO/LiCoO ₂	Litiumkobolttioksidi
LFP/LiFePO ₄	Litiumrautafosfaatti
LMO/LiMn ₂ O ₄	Litiummangaanioksidi
NCA/LiNiCoAlO ₂	Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi
NMC/LiNi _x Mn _y Co _z O ₂	Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi
PEV	Plug-in electric vehicle
SOC	State of charge

1 Johdanto

Sähköautot ovat lisääntymässä kovaa vauhtia Suomessa ja maailmalla, jonka vuoksi on tehty laajasti tutkimuksia siitä, miten täyssähköautojen lisääntymisen tuoma kuormitus voi vaikuttaa sähköntuotannon riittämiseen ja sähköinfrastruktuuriin eri jännitetasoilla. On havaittu, että latauskäyttämisen lisääntyminen voi aiheuttaa siirtoverkon tehomuuntajan käyttölämpötilan nousua yli sallittujen enimmäisrajojen (Rahman & Shrestha 1993). Hallitsemattoman PEV-latausten odotetaan nostavan huippukysyntää ja sähköhintoja, mikä edellyttäisi tuotanto- ja siirtokapasiteetin laajentamista esimerkiksi Yhdysvalloissa (Hadley 2007; Kintner-Meyer ym. 2007). Samanlaisia tuloksia löytyy Saksasta (Gerbracht ym. 2010). Ajoneuvojen sähkön kysynnän kasvun vuoksi sähköhintoihin keskittyvät tutkimukset ennustavat usein sähkön hintojen nousua (Lizhi 2008; Wehinger ym. 2010; Wehinger ym. 2011).

PEV-integraatiolla verkkoon on useita seurauksia, jotka vaihtelevat suurista häviöistä korkeisiin käyttölämpötiloihin, joka johtaa muuntajan nopeutuneeseen ikääntymiseen (Clement-Nys ym. 2010; Farmer ym. 2010). Myös liian matalat jännitteet ja ylikuormitukset ovat tulossa ongelmaksi.

Energiavarastoilla voi olla mahdollisuus ratkaista lisääntyvän sähkökulutuksen tuomia ongelmia, kuten olla tasaamassa huippukulutuksia ja siten parantamaan sähköverkkojen toimintaa, tallettaa uusiutuvaa energiaa myöhemmin käytettäväksi sekä parantaa sähkönlaatua kompensoimalla loistehoa.

Opinnäytetyön tavoitteena on esitellä akkutyypinen energiavarasto yleisesti ja selvittää sen potentiaalista kustannushyötyä liittämällä se sähkölatausjärjestelmään. Tutkimuskysymyksenä työssä on selvittää voiko energiavarasto olla parantamassa sähkölatausjärjestelmän toimintaa, ja tarkastella millä tavoin se voi olla parantamassa toimintaa. Mikä olisi kannattavin akkuvaihtoehto sähkölatausjärjestelmiin, sen kustannus ja takaisinmaksuaika sekä onko kyseisellä aiheella tulevaisuutta.

Työssä toimeksiantajana toimii Kempower oyj yritys, joka suunnittelee, valmistaa ja kaupallistaa sähköajoneuvojen ja erityyppisten koneiden latausratkaisuja ja -palveluja. Opinnäytetyön muotona on tutkimuksellinen työ, jossa valmistetaan tutkimusaineistoa ja toimeksiantajan tarjoamaa dataa hyödynnetään tutkimuskysymyksen ratkaisemisessa.

2 Energiavarasto

Energiavarastot on mahdollistanut monia teknologian innovaatioita, sillä käytämme niitä monissa jokapäiväisissä elektronisissa laitteissa.

Energiavarasto mahdollistaa potentiaali- tai kemiallisen energian muuntamisen laitteille sopivaksi sähköenergiaksi. Energiavaraston tunnetuin muoto on sähkökemiallinen akku, joka varastoi kemiallista energiaa, jota voidaan purkaa sähköenergiaksi. Akun perustana olevaa järjestelmää kutsutaan sähkökemialliseksi kennoksi.

Useammasta akusta koostuvaa varastointijärjestelmää kutsutaan akkuvarastoksi, joka on teollisuudessa käytetty termi. Akkuvarastossa akkuihin varastoidaan suuri määrä sähkökemiallista energiaa myöhemmin käytettäväksi suuren tehon vaativiin tehtäviin. Yleisesti akkuvarasto koostuu akuista, invertteristä, muuntajasta, akunhallintajärjestelmästä, kytkimistä ja ohjausjärjestelmästä. (ABB 2021.)

Akkuvarasto on hyödyksi, kun halutaan tasoittaa energian kulutuskuormia silloin, kun energian kysynnässä on huippuja. Hyötyjä saadaan myös taajuuden säädössä tuoden varmuutta sähköverkon toimintaan, vaihtelevan aurinko- ja tuulienergian säätelyssä ja energiavaraston toiminta energiareservinä, kun sähköntuotannossa on katkoksia tai tehon laadussa ongelmia. (ABB 2021.)

Energian hankintakustannusten optimointi on mahdollista akkuvarastolla silloin, kun sähköenergia otetaan aikana jolloin pörssisähköhintaa on kallista, ja kun energian kulutuskuorman huippua eli huipputehoa leikataan sähkösiirron kustannusten alentamiseksi.

2.1 Akun rakenne ja toimintaperiaate

Akun sähkökemiallinen kenno koostuu metalli- tai muovikotelosta, jossa on sisällä elektrolyyttiliuos, elektrodit, elektrodien välinen erotin sekä varauksen kerääjä. Elektrodeiksi kutsutaan anodia ja katodia, jotka kemiallisen reaktion

tapahtuessa toimivat negatiivisten elektronien lähettäjänä (anodi) ja vastaanottimena (katodi). Jos akun sisällä on useampi eri elektrolyytti, akun sisällä elektrodien välissä on oltava erotin. Erotin mahdollistaa positiivisten ionien kulkemisen vapaasti elektrodien välillä, mutta estää elektrodien ja elektrolyyttien koskemista toisiinsa. Tämä siksi, jotta ei syntyisi oikosulkua. (Hänninen ym. 2019.) Elektrodit ja erotin ovat ionijohtavassa liuoksessa tai kiinteässä aineessa, jota kutsutaan elektrolyytiksi. Elektrolyytin tehtävänä on tasapainottaa akussa tapahtuvaa reaktiota, jotta anodilta lähtevät negatiiviset elektronit korvataan uusilla elektrolyytissä olevilla ioneilla. Vastaavasti katodiin tulevat negatiiviset elektronit saadaan tasapainotettua elektrolyytistä otetuilla positiivisilla ioneilla. (Borah ym. 2020.)

Jotta sähköenergiaa saadaan akusta mahdollisimman paljon, yhdistetään sähkökemialliset kennot moduuliksi, joka sähköisesti kytketään sarjaan tai rinnakkain useampaan eri moduuliin. Akulla tarkoitetaan useasta moduulista koostuvaa systeemiä, ja työssä tarkasteltava akkuvarasto koostuu usean akun muodostamasta systeemistä.

Akun mahdollistaman sähköenergian muodostaa elektronien liike anodilta katodille, joka syntyy hapetus-pelkistysreaktiossa. Hapetus-pelkistysreaktiossa elektropositiivisempi ioniyhdiste luovuttaa elektroneja elektronegatiivisemmalle yhdisteelle, jolloin elektropositiivisempi yhdiste hapettuu ja hapetusluku kasvaa. Vastaavasti elektronegatiivisempi yhdiste pelkistyy ja hapetusluku pienenee. Tällaisessa tilanteessa anodi toimii pelkistimenä, jolla tapahtuu hapettuminen. Vastaavasti katodi toimii hapettimena, jolla tapahtuu pelkistyminen. Reaktio saa alkunsa elektrodien epätasapainoisesta tilanteesta, jolloin reaktioyhtälön kummallakin puolella on eri määrä kunkin alkuaineen atomeja. (Hänninen ym. 2019.)

Elektrodien välillä olevaa potentiaaliero voidaan kuvata akun jännitteellä, joka muodostuu elektrodien normaalipotentialin (E° -arvojen) erotuksesta. Kun akussa ei kulje virtaa, on se silloin tasapainotilassa ja tätä 100 % hyötysuhteen maksimiarvoa kutsutaan lähdejännitteeksi. Nimellisjännite on lähdejännitettä aina pienempi ja tällöin akussa kulkee virta. (Hänninen ym., 2019.)

Eri kemiallisilla yhdisteillä on oma normaalipotentialiarvo, joka tarkoittaa potentiaalia luovuttaa oman elektroninsa hapetus-pelkistysreaktiossa. Kun yhdistetään kaksi yhdistettä, jolla toisella on heikko normaalipotentiali ja toisella vahva, niin saadaan niiden erotuksesta akun jännitteen laskettua. (Science.org 2016a.) Normaalipotentiali saadaan laskettua kaavalla:

$$E^{\circ}(\text{jännite}) = E^{\circ}(\text{katodi}) - E^{\circ}(\text{anodi}) \quad (1)$$

Kaksi elektrodia akussa muodostavat sähköparin. Esimerkiksi auton lyijyakku antaa 12-volttia kokonaisjännitettä, jolloin auton akussa olevasta normaalipotentialista ($E^{\circ} = 2V$) voidaan laskea, että akussa on 6 sähköparia ($12V/2V=6$).

Akkua tarkastellessa on tärkeää huomioida C-arvo, joka kuvastaa mitta-arvoa, kuinka nopeasti akku on ladattu täyteen tai täysin purkaantunut. 1C-virran arvo tarkoittaa, että 10Ah akku kykenee tarjoamaan 10A tunnissa virtaa. Toisaalta 10Ah akku, jossa on 0.5C arvo pystyy tarjoamaan 5A tunnissa virtaa. Suuri C-arvo kertoo, että akku kykenee tarjoamaan suuren virran lyhyessä ajassa, esim. 30C arvo tarjoaa 3000mAh akusta 90A virtaa ($30C \cdot 3Ah$) ja aika, joka kestää akun purkamiseen on 2min ($60\text{min}/30C$). (power-sonic.com 2020.)

Kun halutaan akku, joka kykenee syöttämään tarpeeksi suurta tehoa lyhyessä ajassa, tarvitaan akku, jonka C-arvo mahdollistaa nopean purkauksen. Etenkin sähköautojen pikalatauksessa virta saattaa olla monia satoja ampeereja.

Kempower c-500 ja c-800 sarjan latausjärjestelmät vaativat sähköverkosta saatavaa syöttövirtaa jatkuvassa käytössä 65-780A. (kempower.com 2021.)

Kuitenkin edellä mainittua sähköverkosta otettua syöttövirtaa ei voida täysin verrata tasavirtaan, jota vaaditaan sähköautoakun lataukseen.

2.1.1 Akun lataus

Kun primääriakku on käynyt kemiallisen prosessin, jossa sillä ei ole enää tarjota sähkövirtaa on se silloin purkautunut loppuun. Kuitenkin akkuja voidaan ladata takaisin lähtöpisteeseen, jolloin se kykenee taas toimimaan energiavarastona.

Akkuja, joita pystytään ulkoisella sähkövirralla lataamaan uudelleen, kutsutaan sekundääriakuiksi.

Akun lataus toimii päinvastaisella tavalla kuin sen purkaus eli ulkoisen sähkövirran liittyessä sähköpiiriin positiiviset ionit palaavat elektrolyytistä takaisin anodiin, ja elektronit siirtyvät takaisin katodilta anodille. Tämän jälkeen akku on taas valmiina purettavaksi. (Science.org 2016a.) Kuitenkaan lataus ei ole täydellinen minkä vuoksi elektronit palatessaan anodille ovat heikentyneitä, mikä heikentää akun toimintakykyä.

Akun lataustila (SOC) tarkoittaa kapasiteettia, joka sillä hetkellä on käytettävissä nimelliskapasiteetin funktiona. Sitä käytetään määrittämään akun lataustason jäljellä oleva taso ja se ilmaistaan prosentteina. Kun SOC on 100-prosenttia, akun sanotaan olevan täysin ladattu. Ikääntynyt solu, joka on ladattu monta kertaa, menettää kapasiteettinsa, mikä tarkoittaa, että 100 %:n lataustila vastaisi 75–80 % verrattuna uuteen soluun. Akun SOC-arviointi on tärkeä osa akunhallintajärjestelmää, koska se auttaa kuvaamaan akun todellista energiatasoa. (Tribioli ym. 2021)

2.1.2 Akun varaustilan määrittäminen

Akun varaus määräytyy kertomalla virta sen kulkuajalla. Ongelmana on purkausvirran vaihtelevuus akun tyhjentyessä sen sijaan, että se pysyisi vakiona.

Vakiomenetelmä lyijyakkujen varaustilan määrittämiseksi on ominaispainomittaus. Vaikuttavien aineiden painon muutosten mittaaminen on välttämätöntä. Aktiivinen elektrolyytti rikkihappo kuluu, kun akku tyhjenee ja rikkihapon määrä vedessä vähenee. Tämä puolestaan alentaa liuoksen ominaispainoa suoraan suhteessa varaustilaan. Siksi elektrolyyttiä voidaan käyttää akun varaustilan määrittämiseen. Viisi tekniikkaa, joita voidaan käyttää epäsuoraan varaustilan laskemiseen ovat kemiallinen-, jännite-, virran integrointi-, Kalman-suodatus- ja painetekniikka. Litiumkennon käytettävä

kapasiteetti ei ole vakio, ja se vaihtelee suuresti lämpötilan, varauksen purkautumisnopeuksien ja kennon iän mukaan. (mpoweruk.com 2005a.)

Litiumioniakkujen varaustilan määrittäminen on hankalaa, sillä sen purkauskäyrä on liian tasainen, jolloin jännitteen muutos on hyvin pieni. Kuitenkin litiumioniakkujen varaustila voidaan määrittää käyttämällä coulombin laskumenetelmää. Se on kaikista paras keino määrittämään litiumioniakun varaustilaa, sillä se mahdollistaa vain alle 1 % mittausvirheen. Coulombin laskumenetelmässä virta integroidaan akunkennon käytön kanssa, jolloin saadaan akussa olevien elektronien määrä latauksessa ja purkauksessa. (Powertechsystems n.d.)

Purkautuneen akun prosenttiosuus suhteessa sen koko kapasiteettiin tunnetaan purkaustilaksi (DOD). Esimerkiksi jos akun kapasiteetti on 6 kWh ja purat siitä 3 kWh, akun purkaustila on 50 % (3 kWh / 6 kWh). Tämän seurauksena varaustila ja purkaustila ovat käänteisesti yhteydessä DOD:n kasvaessa SOC:n pienentyessä.

Lataustilaa käytetään tyypillisesti kuvaamaan akun nykyistä tilaa, kun taas purkautumistilaa käytetään yleisimmin kuvaamaan akun käyttöikää jatkuvan käytön jälkeen. Tämä tarkoittaa, että akun käyttöikä lyhenee huomattavasti, jos akkua puretaan alle 20 % tai jopa 50 %. Mitä enemmän puramme akkua, sitä vähemmän käyttöjaksoja voimme käyttää. Akkujen valmistajat määrittelevät tuotteilleen tietyn purkaustila-ajan. Tämä raja edustaa suurinta mahdollista purkaustilaa ilman, että akun suorituskyky heikkenee tulevaisuudessa. (solarips.com 2021.)

Kun täyteen ladattu akku ei vastaa enää 100-prosenttia, vaan 80-prosenttia niin on akku tällöin eliniän lopussa, ja syy akun kapasiteetin pienenemiseen johtuu itsepurkautumisesta tai muisti-ilmiöstä. (Science.org 2016a.) Yksi syy akun itsepurkautumiselle on galvaaninen korroosio, jossa kaksi elektrolyytin kanssa kosketuksissa olevaa metallielektroodia joutuu sähköiseen kontaktiin, joka johtaa litiummetallin hapettumiseen ja sen liukenemiseen. Itsepurkautumista tapahtuu kiinteän elektrolyytin välifaasin ollessa vahingoittunut. (Merril ym. 2021.)

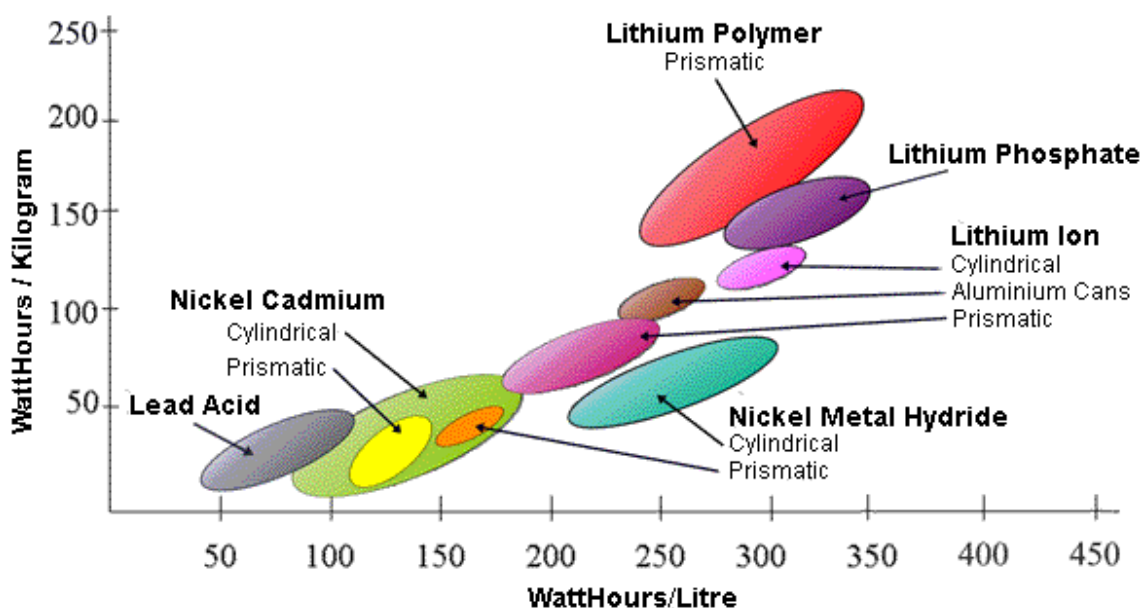
Uudelleen ladattavista sekundääriakuista nikkeli-metallihybridi- ja nikkeli-kadmiumakut kärsivät muisti-ilmiöstä, jossa toistuvien latausten jälkeen ne menettävät akkukapasiteettiaan alentuneen käyttöjännitteen vuoksi. Ilmiö havaitaan tarkastellessa purkautumiskäyriä, jossa akku käydessä useiden latauskertojen jälkeen käyrän pohjalla, alkaa muistamaan edellisen purkauksen syvyyden. Toisin kuin edellä mainitut akustot, litiumioni akuilla ei ole todettu olevan muisti-ilmiötä. (Sasaki ym. 2013.)

Litiumakkujen suorituskyvyn heikentyminen eli ikääntyminen on seuraus litiumin kulumisesta. Litiumin kuluminen johtuu elektrolyytin hajoamisesta, jonka vuoksi elektrodien pinnalle muodostuu litiumia kuluttava passivoitunut kerros. (Nowak 2021.)

3 Akkutyypit ja niiden jaottelu

Sekundääriakkutyyppejä on monia ja ne erotaan niiden elektrodimateriaalin ja elektrolyyttiyhdistelmien mukaan. Erilaisia yhdistelmiä on litiumioni- (Li-ion), litium-rautafosfaatti- (LiFePO₄), litiumionipolymeeri- (Li-ion-polymeeri), nikkeli-kadmium- (NiCd), nikkeli-metallihydridi- (NiMH) ja lyijy-happoakku, kuten (kuva 1) perusteella voidaan huomata. Kallis mutta huomion arvoinen sekundääriakkutyyppi on litiumtitaaniakku- (LTO), joka kykenee suuriin käyttösyklien määrään ja nopeaan lataukseen.

Alla olevasta kuviosta nähdään eri akkutyypin energiatiheys sekä ominaisenergia. Energiatiheys kuvastaa kuinka paljon energiaa on varastoitunut suhteessa tilavuuteen (Wh/l), kun taas ominaisenergia kertoo paljonko energiaa on varastoitunut suhteessa massaan (Wh/kg).



Kuva 1 Eri akkutyypin energia-arvoja y-akselilla ominaisenergia ja x-akselilla energiatiheys. (mpoweruk.com 2005b.)

3.1 Lyijyakku

Lyijyakussa molemmat elektrodit koostuvat lyijystä, sillä anodissa materiaalina on lyijymetalli (Pb), ja katodissa materiaalina on lyijydioxiidi (PbO₂). Elektrodit ovat elektrolyyttiliuoksessa, joka koostuu rikkihaposta (H₂SO₄).

Toimintaperiaate perustuu hapetus-pelkistysreaktioon, jossa lyijyä sisältävät elektrodit muodostavat lyijysulfaattia ja rikkihappoelektrolyytti liukenee vedeksi. Ladattaessa lyijysulfaatti liukenee takaisin elektrolyyttiin ioneiksi, jolloin reagoiessa elektronien kanssa muotoutuvat ne samaksi yhdisteeksi elektrodihin. (Science.org 2016b.) Lyijyakkuja käytetään esimerkiksi polttomoottoriautoissa sähkölaitteiden virtalähteenä ja auton käynnistämiseen.

3.2 Nikkelikadmiumakku

Nikkelikadmiumakuissa anodi on kadmiumia ja katodi nikkelioksidihydroksidia. Elektrolyyttinä toimii kaliumhydroksidi. Nikkelikadmiumakut olivat ensimmäisiä sekundääriakkuja, jotka toivat energiaa elektronisiin laitteisiin, kunnes litiumioniakut syrjäyttivät ne. (Science.org 2016b.)

3.3 Litiumioniakku

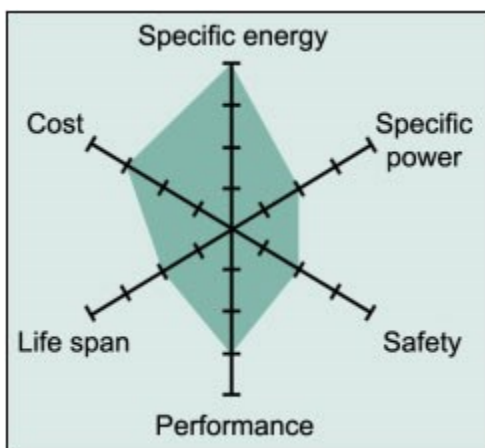
Litiumioniakku mahdollistaa tietokoneiden, puhelinten ja suurimman osan elektroniikan toiminnan varastoimalla energiatehokkaasti kemiallista energiaa. Suuren energiatihedden vuoksi litiumioniakut ovat muihin ladattaviin akkuteknologioihin verrattuna markkinoiden suosima akkutyyppi.

Litiummetalli akut ovat sopivimpia suuren energiatihedteen vaativissa tehtävissä, sillä ne omaavat suuren teoreettisen akkukapasiteetin (Merrill ym. 2021). Suuri kapasiteetti on mahdollista, koska sen käyttöjännite on suurempi (noin 4 volttia) vedettömän elektrolyytin vuoksi. Kun taas elektrolyyteissä, joissa muodostuu vettä, käyttöjännite on rajoitettu 2-volttiin. (Manthiram 2017.)

Litiumioniakuissa anodina on käytetty grafiittia, sillä se on erityisen johtava materiaalia ja sen saatavuus on hyvä. Grafiitti pärjää materiaalina muihin sen ollessa hyvin suorituskykyinen ja pienen jännitteensä vuoksi sillä on suuri energiatiheys. (BatterityUniversity.com 2021a.)

Katodina taas yleisimpinä vaihtoehtoina on litiummangaanioksidi (LiMn_2O_4), litiumrautafosfaatti (LiFePO_4), litiumnikkelimangaanikobolttioksidi ($\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$), litiumkobolttioksidi (LiCoO_2) tai litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (LiNiCoAlO_2). (wikipedia.org 2022.)

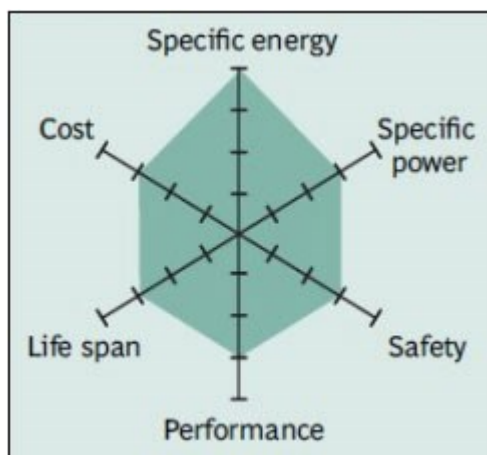
Litiumkobolttioksidi (LCO) on yleisesti käytetty tietokoneiden, matkapuhelimien ja digikameroiden akkuina, sillä akussa on korkea ominaisenergia 150–200 Wh/kg. LCO-akun heikkoutena on sen lyhyt käyttöikä, huono lämpötila kestävyys ja pieni kapasiteetti. C-arvo akulla on 0,7–1, joten se ei kykene nopeisiin purkaus ja lataustoimenpiteisiin. Litiumkobolttiakut ovat häviämässä suosiotaan litiummangaaniakkuihin sekä erityisesti NMC- ja NCA-akutyypeille, koboltin korkean hinnan vuoksi sekä muiden akkujen katodimateriaalien kyky sekoittua paremmin keskenään. (BatterityUniversity.com 2021b.)



Kuva 2 Litiumkobolttioksidin kaavio (BatterityUniversity.com 2021b.)

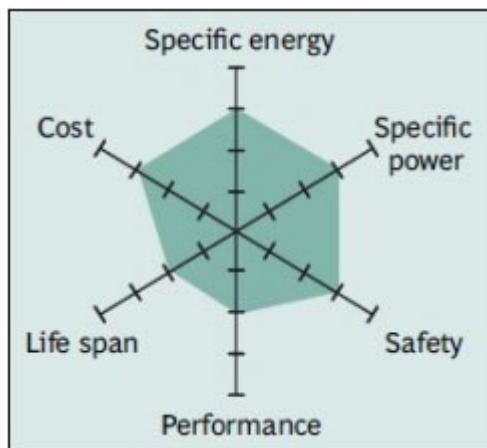
Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi (NMC) omaa korkean kapasiteetin (n. 180Ah/kg) metallien hyvän johtavuuden vuoksi, mutta kärsii kemiallisesta tai rakenteellisesta epävakaudesta ladattaessa akkua. NMC-akuissa ominaisenergian arvo on 15-220Wh/kg. Tässä akkutyyppissä nikkeli ja mangaani

korjaavat toistensa heikkouksia, sillä nikkeli omaa heikon stabiliteetin mutta korkean tehotiheyden, kun taas mangaani kykenee sisäiseen resistanssiin. Näitä akkutyyppejä käytetään useasti sähköautoissa, työkaluissa ja lääketieteellisissä laitteissa. (Science.org 2016c; BatteryUniversity.com 2021b.)



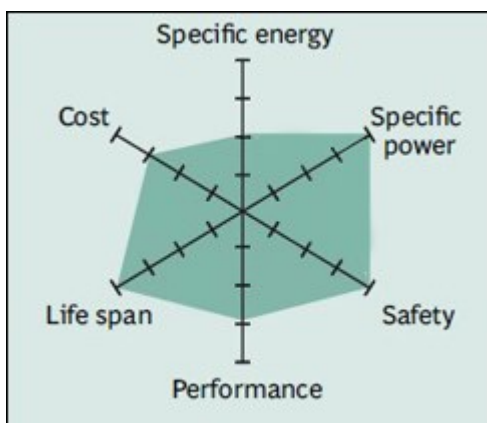
Kuva 3 Litiumnikkelimangaanikobolttioksidin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)

Litiummangaanioksidin (LMO) rakenteeltaan kolmiulotteinen spinelli, jonka vuoksi sillä on korkea lämpöstabiilisuus, alhainen sisäinen resistanssi, sekä se on turvallinen. Matala sisäinen kennovastus mahdollistaa nopean kennon purkauksen ja latauksen. Purkausvirta on mahdollista 20-30A jatkuvalla käytöllä, mutta korkeimmilla purkausvirroilla akku kykenee vain sekunnin pulssisyöttöihin ylikuumentumisen vuoksi. LMO-akkuja käytetään lääketieteellisissä sovelluksissa ja hybridi- sekä täyssähköajoneuvoissa. (BatteryUniversity.com 2021b.)



Kuva 4 Litiummangaanioksidin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)

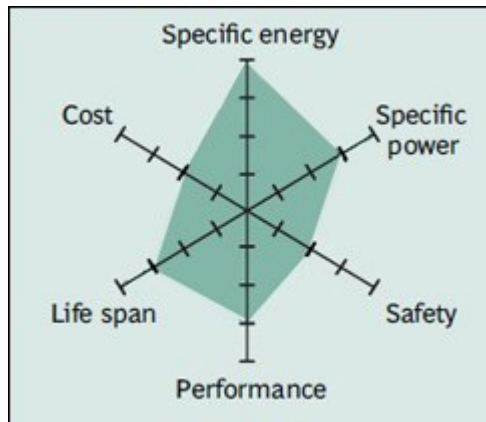
Litiumrautafosfaatti (LFP) tarjoaa turvallista ja vakaata toimivuutta eri lämpötiloissa, mutta kärsii myös huonommasta virran tuottamasta kapasiteetista (160Ah/kg). Hyvä sähkökemiallisen suorituskyvyn mahdollistaa nanokoon fosfaattikatodi materiaalina. LFP-akku sietää muihin litiumioniakkuihin verrattuna paremmin täyden varauksen tilaa sekä korkeita jännitteitä. Kuitenkin akku kärsii nopeammasta itsepurkautumisesta ilman kalliita kennoja sekä ohjauselektroniikkaa. (Manthiram 2017; BatteryUniversity.com 2021b.)



Kuva 5 Litiumrautafosfaatin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)

Litiumnikkelikobolttialumiinioksidi (NCA) tarjoaa korkean ominaisenergian 200-260Wh/kg, kohtuullisen hyvän ominaistehon ja pitkän käyttöiän, mutta kärsii

heikosta turvallisuudesta ja korkeista kustannuksista. (BatteryUniversity.com 2021b.)



Kuva 6 Litiumnikkelikobolttialumiinioksidin kaavio (BatteryUniversity.com 2021b.)

Manganaa sisältävät akut ovat vetovoimaisempia mangaanin ollessa halvempaa ja haasteista huolimatta sillä on suuri tehopotentialiaali ja pidempi kestoinen akun elinikä. Haasteet liittyvät mangaanin liukenemiseen elektrolyyttiin akun käytön aikana, joka johtaa huonoon toiminnan vakauteen. (wikipedia.org 2022.)

Elektrolyyttinä mainituissa akuissa käytetään litiumsuolaliuosta (LiPF₆) sekoitettuna orgaanisiin lioksiin, kuten mm. dietyylikarbonaatti (DEC), dimetyylikarbonaatti (DMC), etyyylimetyylikarbonaatti (EMC) ja eteenikarbonaatti (EC). (Science.org ^[3] 2016.)

Taulukko 1 Yhteenveto litiumakuista

Akku	Ominaisenergia Wh/kg	Tyypillinen käyttöjännite V/kenno	C-purkausarvo	Käyttöikä, sykliä määrä	Hinta \$/kWh
LCO	150-200	3.0-4.2	1C	500-1000	-
NCA	200-260	3.0-4.2	1C	500	350
LFP	90-120	2.5-3.65	1-25C	>2000	580
LMO	100-150	3.0-4.2	1-10C	300-700	-
NMC	150-220	3.0-4.2, tai enemmän	1-2C	1000-2000	420

Taulukosta 1 voidaan tulkita, että energiavarastoksi sopisi parhaiten Litiumnikkelimangaanikobolttioksidi (NMC) tai litiumrautafosfaatti (LFP), koska niiden korkea käyttöikä mahdollistaa usean lataus- ja purkauskerran. Jotta sähköautoja voidaan ladata akun kautta, täytyy akun kyetä useaan purkaus/latauskertaan ja tuottamaan suurta tehoa pikalatausta varten. LFP-akku sopisi C-arvon ja suuremman käyttöikänsä perusteella paremmin energiavarastoksi, mutta kärsii korkeammasta hinnasta ja matalammasta ominaisenergiasta. Taulukon 1 tiedot ovat haettu lähteestä (BatteryUniversity.com 2021b).

3.4 Akun kustannukset

Keskiarvoltaan litiumioniakkujen hinta per kilowattitunti on noin 132 \$/kWh (138 €/kWh) vuonna 2021, mikä on 89 % hinnan pudotus vuodesta 2010, kun hinta oli 1200 \$/kWh. Hintojen oletetaan laskevan tulevaisuudessa vielä enemmän, kun teknologia kehittyy ja akuista tulee kustannus houkuttavampia. (Henze 2021.) Toisen lähteen mukaan litiumioniakkujen hinta etenkin litiumrautafosfaattien, nousi 10–20 prosenttia 110 dollariin kilowattitunnilta (113 €/kWh) vuoden 2021 jälkipuoliskolla (Saiyid 2022). Hinta arvot kertovat vain

akun kustannuksesta, mutta eivät ota huomioon akkuvarastossa vaativaa elektroniikkaa, kuten jäähdytysjärjestelmää, muuntajaa, akunhallintajärjestelmää yms.

Akkuvaraston kustannukset vuonna 2022 ovat arvioltaan 300kW/1200kWh varastoissa \$672/kWh (639€/kWh) National Renewable Energy Laboratory (NREL) raportin mukaan. Raportin hinta arvio on mallinnettu markkinahinta, joka on yhdenmukainen NREL aikaisempien vertailuarvojen kanssa. NREL vertailuarvot perustuvat kansallisiin keskiarvoihin eivätkä välttämättä edusta tyypillisiä kustannuksia kaikilla paikallisilla markkinoilla. (Ramasamy ym. 2022.)

4 Sähkölatausjärjestelmä

Sähköajoneuvoilla alkaa olla suuri kannattajakunta ja ne alkavat integroitumaan paremmin sähköverkkoomme. Sähköajoneuvot ovat siirtymää kohti kestävämpää liikennettä, ja muutoksen myötä tulee vaatimuksia verkon päivittämisen ja joustavuuden kannalta. Sähkösäätimillä on korkeampi hyötysuhde kuin polttomoottoreilla, ja ne tuottavat vähemmän päästöjä ja melua. Huomattavin hyöty sähköajoneuvoista olisi kuitenkin fossiilisten polttoaineiden syrjäyttäminen ja näin ilmastotavoitteisiin pääseminen. Sähköajoneuvot vaativat kuitenkin infrastruktuurin kehittämistä, jotta latauspisteitä on tarpeeksi ja että ajoneuvon vaihtaminen polttomoottorista sähköiseen olisi houkuttelevaa. Sähköauto tarvitsee toimintaansa varten virtaa, mikä tuodaan ajoneuvon akusta moottorille. Kun akku lähenee tyhjenemistään latausjärjestelmät ovat tärkeässä asemassa tällöin.

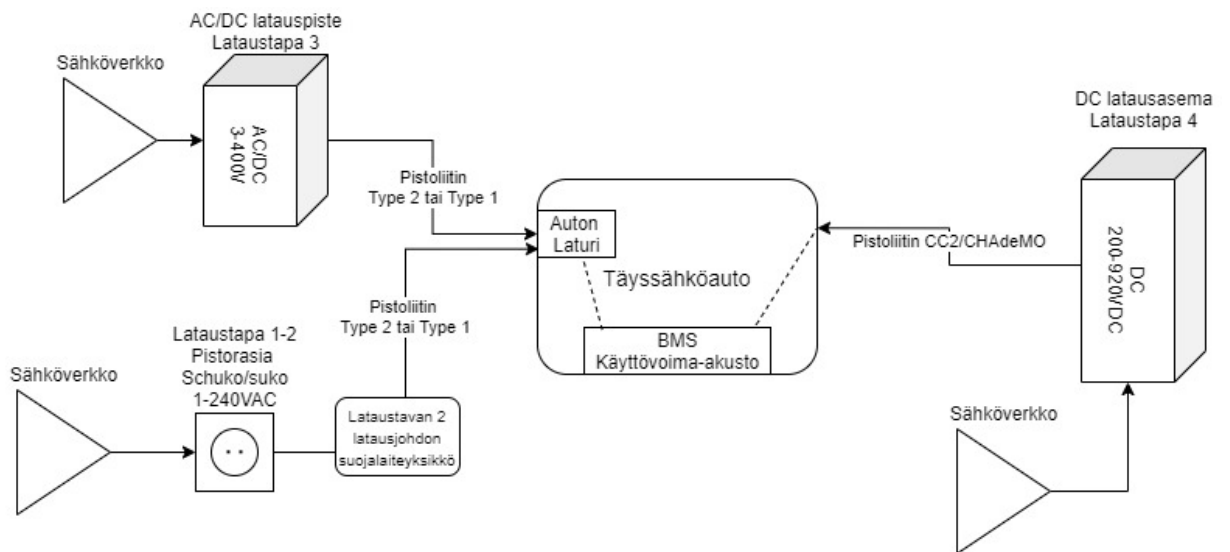
Sähkölatausjärjestelmiä on vaihtosähköllä (AC) ja tasasähköllä (DC) toimivia riippuen käyttötarkoituksesta ja niiden muodostamaa yhtä tai useampaa latauspistettä kutsutaan latausasemaksi. Latausasema on aina kytkettynä sähköverkkoon, josta yksinkertaisimmillaan AC-latausasemassa vaihtovirta kulkee ryhmäkeskukseen kytketyn latausrasian läpi johdolle, josta sähköauto saa tarvitsemansa latausvirran. DC-latausasemia yleisesti kutsutaan teho- tai pikalatausasemiksi, sillä niiden latausaika on lyhempi. DC-latauksessa sähköverkosta tuleva vaihtovirta muutetaan sähköauton akulle sopivaksi tasavirraksi latauspisteessä. (Orrberg & Linja-Aho 2019.)

4.1 Lataustavat

Lataustapoja neljää eri tapaa, joista tavat 1–2 hyödyntää sähköauton latauksessa vaihtovirtaa ja tavat 3–4 yleisimmin tasavirtaa. Vaihtovirralla toimivat lataustavat sopivat tilapäiseen lataukseen ja latausteho saadaan kotipistorasian kautta. Teho vaihtovirralla ladattaessa on pieni, sillä tavan 2 kykenee tarjoamaan maksimissaan 22kW.

Lataustavat 3 ja 4 tarkoittavat kiinteästi asennetulla latauslaitteella tapahtuvaa sähköauton latausta, esimerkiksi latausasemalla. Lataustavalla 4 tarkoitetaan tarkemmin pika- tai tehollatausta, koska teho on 40kW ylöspäin ja se on aina tasavirralla toimivaa. Opinnäytetyön tarkastelussa käytetään lataustapoja 3–4, joissa akkuvarasto on latausaseman yhteydessä.

Alla olevasta kuvasta voidaan havainnollistaa latausaseman rakennetta ja nähdä eri lataustyyppeihin tarkoitetut pistooliliittimet.



Kuva 7 Latausjärjestelmä

4.2 Latausaseman suunnittelu

Yleisesti ottaen latausasemat suunnitellaan niiden käyttötarkoituksen perusteella siten, että tehomitoitus suunnitellaan toimintasäteen ja latausajan perusteella. Suuret lataustehot löytyvät kauppohen pihalta, jossa käyttäjän oletetaan olevan muutamasta minuutista muutamaan tuntiin. Kotitalouksissa teho on pienempi, sillä latausajat voivat olla useita tunteja. Lataustehot mitoitetaan 2kW:sta jopa 500kW, jossa suurteholataus vaatii nestejäähdytteiset latauskaapelit sekä pistooliliittimet. Toimintasäde mitoitetaan sähköauton kulutuksen mukaan, joka on keskimäärin 20kW/100 km luokkaa. Näiden avulla latausasema voidaan suunnitella tuovan käyttäjälle 100 km toimintamatka tunnissa, jolloin latausteho mitoitetaan 20kW:n. (Orrberg & Linja-Aho 2019.)

Julkisissa latauslaitteissa vaaditaan älykästä järjestelmää, jolloin latauslaitteeseen sisältyy myös ohjausjärjestelmä. Laissa älykäs latauslaite on määritelty seuraavanlaisesti:

Älykkäällä latauksella tarkoitetaan latausjärjestelmää, joka sisältää tietoliikenneyhteyden ajoneuvon ja latauslaitteen välillä sekä tietoliikenneyhteyden latauslaitteen ja latauspalveluntuottajan välillä mahdollistaen lataustapahtuman reaaliaikaisen mittauksen ja ohjauksen sekä lataustehon porrastetun säädön ylöspäin ja alaspäin kesken lataustapahtuman ilman, että lataus keskeytyy. (Laki liikenteessä käytettävien vaihtoehtoisten polttoaineiden jakelusta 2017/478, 3:6)

4.3 Dynaaminen tehojako

Sähköautojen latausasemilla käytetään usein dynaamista kuormanhallintaa, jossa älykäs latauslaite jakaa ladattavien sähköautojen kesken suurinta mahdollista lataustehoa. Dynaaminen tehonjako huomioi autojen kykyä vastaanottaa lataustehoa, auton akun lataustilaa sekä ladattavien autojen määrää. Esimerkkinä 300kW latausteho pystytään jakamaan neljälle sähköautolle siten, että jokainen saa vain 75kW lataustehon, kun taas yksin oleva auto pystyisi teoriassa vastaanottamaan 300kW lataustehon. (abcasemat.fi n. d.)

Vaikka älykäs tehonjako kykenee jakamaan lataustehoa tasaisesti autojen kesken, syntyy kuitenkin ongelma, kun halutaan mahdollisimman suuri teho pikalatausta varten ja tehojaon vuoksi haluttu latausteho on huomattavasti pienempi. Esimerkiksi uudet 2020-luvun autot kykenevät vastaanottamaan 250-270kW lataustehoja sillä ehdolla, että akut ovat lähes tyhjiä (stek.fi 2021).

5 Energiavarasto latausjärjestelmässä

Kun tarkastellaan mikä olisi paras akkutyypin sähkölatausjärjestelmään tulisi tarkastella akun kapasiteettia, energiatiheyttä, akun käyttöikä, kuluja, turvallisuutta ja ympäristönvaikutuksia.

Lyijyakkujen käyttö ei ole kannattavaa sillä niiden energiatiheys on todella pieni, jolloin ne vaativat suuren tilan energian varastointiin. Ne eivät myöskään ole ympäristöystävällisiä niiden hävitysprosessin ja tuottamisen aikana (Atmaja ym. 2015.)

Nikkeliakuilla on myös suhteellisen pieni energiatiheys, joka ei sovi suuren energian varastointiin. Nikkelisinkkiakuilla on myös lyhyt käyttöikä, nikkelikadmium kärsii muisti-ilmiöstä ja nikkeli-metallihydroksidi vaatii monimutkaisen teknologian toimiakseen korkeiden lämpötilavaikutusten vuoksi. (Atmaja ym. 2015.)

Litiumioniakku on yleisimmin käytössä energiavarastoina, sillä sen energiatiheys on korkea sekä ominaisenergia ja ominaisteho on suuri. Litiumioniakut eivät myöskään kärsi niin huomattavasta käyttöiän heikkenemisestä. Toisaalta litiumioniakut kärsivät suurista tuotantokustannuksista, koska turvalliseen toimintavarmuuteen akku vaatii suojapiirin. Litiumioniakuista litiummetalli on kaikista kallein materiaali, mutta turvallisin vaihtoehto. Litiumsulfaatti kärsii lyhyestä käyttöiästään sen suuresta energiakapasiteetista huolimatta. Litiumionipolymeeriakku on eri käyttösovelluksiin kaikkein paras, sillä se kykenee materiaalina taipumaan sekä olemaan toiminnalta luotettava. Litiumionipolymeeriakussa elektrolyytti on kiinteä, jolloin elektrolyytin vuotovaaraa ei ole toisin kuin muissa akuissa. Haasteena on sen huono ionijohtavuus ja pieni lataussyklien määrä. Potentiaaliseksi vaihtoehdoksi energiavarastolle muodostuu litiumrautafosfaatti, jonka etuna on suuri C-arvo, lämpötila- ja kemikaalinen toimintavarmuus sekä hyvä käyttöikä. Litiumrautafosfaatin haittana on sen suuri hinta ja pieni ominaisenergia. Litiumnikkelimanganikobolttioksidi (NMC) kykenee suureen tehontuottoon pitkällä aikavälillä suuren ominaisenergian vuoksi, sekä korkean

käyttöään vuoksi akku olisi myös soveltuva energiavarastoksi. NMC-akkuja on jo sovellettu energiavarastoina sähkölatausjärjestelmien yhteydessä esim. ABB teollisuuskonserni on kehittänyt energiavaraston (ABB eStorage flex) soveltumaan eri kohteisiin kuten kerrostalojen ja latausjärjestelmien huipputehojen laskemiseen. Myös Solar Factory Oy on toteuttanut HELEN Oy:lle projektin, jossa on käytetty prismaattista NMC-akkuja energiavarastona tarkoituksena huipputehon leikkaamiseen, jolloin sähköautojen latauksesta aiheutuvia kustannuksia voidaan vähentää. (Atmaja ym. 2015; ABB 2021; Solarfactory.fi 2021.)

5.1 Miten energiavarasto tulisi olemaan osa sähkölatausjärjestelmää

Energiavaraston liittäminen sähkölatausjärjestelmään tulisi tapahtua siten, että se kykenee syöttämään tehoa oikean suuruisella jännitteellä, se ei häiritse järjestelmän muuta toimintaa sekä, että se pystyy tarvittaessa kytkeytymään päälle tasapainottaakseen suurinta kuormankysyntää. Suuri C-arvo ja lähtöteho ovat myös tarpeen, jotta voidaan mahdollistaa nopea tehollataus.

Energiavaraston tulisi myös olla kompaktin kokoinen ja rakennettu kestävästi erinäisiä sääolosuhteita, jotta se voidaan sijoittaa latausasemien yhteyteen esimerkiksi ulos tai parkkihalliin.

Jos tavoitteena on leikata huipputehoa energiavarastolla, tulisi kulutuksen ennustettavuus olla tiedossa. Tähän pystytään käyttämään tilastoitua dataa vuoden energiankulutuksesta, jolla nähdään suurimmat huipputehon hetket. Energiavaraston kytkeytymiselle voidaan määrittää tietty kulutuksen ylittävä raja-arvo, jolloin se kytkeytyy päälle. Latausaseman kulutuksen ennustettavuus voi olla heikkoa silloin, kun huippukulutus on paljonkin sattumasta kiinni. Tärkeää on huomioida, että energiavaraston ei tulisi lisätä huipputehon arvoa ladattaessa täyteen, sillä se lisäisi sähkönsiirtokustannuksia.

Huipputehoon voidaan vaikuttaa pientuotannolla ja energiavarastolla, jossa energiaa varastoidaan alhaisen kulutuskysynnän aikana ja syötetään huippukulutusaikana. Tällä tavalla voidaan pienentää sähkönkulutukseen

liittyviä kustannuksia, kun sähkönkuormitusta tasapainotetaan leikkaamalla sähkönkulutusta hintojen ja kulutuksen ollessa korkeimmillaan. (Mertanen 2022.)

Energiavarastolla voi pienentää latausaseman kustannuksia, kun sähkönhinta määräytyy pörssisähkön mukaan. Kustannussäästöt tehdään ladatessa akkua halvimmilla tuntihinnoilla ja käyttäessä kalliimmilla tunneilla. Latausasemalla se voisi olla hyvin mahdollinen ratkaisu, sillä latausjärjestelmän suurimmat käyttötunnit tapahtuvat sähkönhinnan ollessa korkeimmillaan. Aineistoa tutkimalla voidaan todeta, että suurin osa lataustapahtumista tapahtuu aikavälillä 12–24, kun harvempi lataustapahtuma on aikavälillä 00–12. Tämän vuoksi akkuvaraston lataus yöllä ei lisäisi huipputehoa ja sen käyttö on kannattavaa aikavälillä jolloin sähkönhinta on kalliimpaa.

Energiavaraston liittäessä latausasemaan tulisi ottaa huomioon, että se tarvitsee tasasuuntaajan ottaessaan tarvitsemansa energian sähköverkosta, mikä voi lisätä loistehon ottoa, ellei sitä kompensoida.

5.2 Tutkimusmenetelmien esittely

Tavoitteena on tarkastella, että onko energiavarastolla mahdollista laskea latausaseman sähkönhankintakustannuksia energiavaraston ollessa kytkettynä sähkölatausjärjestelmään, ja verrata niitä akkuvaraston hankintakustannuksiin. Akkuvarastosta saatava potentiaalinen hyöty olisi kustannusten puolesta sähkönhankintahinnan aleneminen huipputehon leikkauksessa ja sähköenergian ottaminen akkuvarastosta sähköverkon sijaan, kun sähkön pörssihinta on kallista. Akkuvaraston tuomia kustannuksia on sen hankinta, asennus, huolto ja mahdollisesti jälkikäsitteily. Tekstissä (sivu 22) aiemmin mainittua kustannusarvoa akkuvarastolle (639€/kWh) käytetään työssä energiavaraston kustannusten laskennassa. Akun tarkkaa hintaa on vaikea määrittellä, sillä lähteitä eri kustannuksista oli paljon ja yritysten hinnoittelemat akun kustannukset voivat olla paljonkin toisista riippumattomia.

Työssä käytettiin kolmea sähköverkkoyhtiön tarjoamia sähkönsiirron verkkopalveluhinnastoja, joita käytettiin sähkönkustannusten laskentaan. Verkkoyhtiöt, joita työssä tarkastellaan ovat Helen Sähköverkkoyhtiö, Lahti Energia sekä Turku Energia.

6 Sähköhinnan muodostuminen

Suomessa jakeluverkkoja hoitaa sähköverkkoyhtiöt, joita on yhteensä 80-toimijaa. Kuluttajan sähkölaskussa oleva sähköenergia on mahdollista kilpailuttaa sähkösopimusta tarjoavalta taholta, kun taas sähkönsiirron osuus, jonka paikallinen jakeluverkkoyhtiö hoitaa, ei voida kilpailuttaa. (Energia.fi, n. d.)

Sähkönhinta muodostuu kulutetusta sähköenergiasta, palvelu- ja liittymishinnasta sekä sähköveron osuudesta. Sähköverkkoyhtiöt tarjoavat eri sähköliittymiä, jolla kuluttaja kykenee liittymään sähköverkkoon.

Sähköpalveluhinta muodostuu perus- ja siirtomaksusta, jossa kuluttajan sähköä mitataan sähköverkkoyhtiön toimesta energiamittarilla. (Halonen 2011.)

Sähkönsiirtoon kuuluu kulutusmaksu eli tehonsiirto, perusmaksu sekä sähkövero ja arvolisävero. Tehonsiirrossa kulutusta tarkastellaan tunnin mittausjaksoina, jossa energiamittari ottaa jokaisen tunnin sähkönkulutuksen. Turku Energian tehonsiirto sopimuksessa energian kulutuksesta muodostetaan 12 kuukauden tarkastelujakso, jossa laskutettava pätötehomaksun määräävän huipputehon mittausjakso on yksi tunti. Turku Energian tehomaksu määräytyy kahden kuukauden suurimmista huipputehoista, joista muodostetaan keskiarvo. Helen sähköverkkoyhtiöllä tehosiirtomaksu määräytyy vuoden kaikkien kuukausien suurimmasta mitatusta tunnin keskitehosta aikavälillä maanantaista perjantaihin klo 7–21. Lahti energian verkkopalveluhinnaston mukaan tehosiirtomaksu määräytyy edellisen 12kk aikana mitatun suurimman tunnin aikana kulutetun huipputehon mukaan. (turkuenergia.fi 2022; helensähköverkko.fi 2020; lahtienergia.fi 2022.)

Tehosiirtoon perustuvassa verkkopalveluhinnastossa maksetaan myös loisteho annosta/otosta maksua (€/kVAr) kuukausittain mitatun määrän mukaisesti. Loistehosta peritään maksua, koska se lisää verkon häviöitä ja kuormittaa siirtojohtoja. Lahden energialla kunkin kuukauden mitatusta pätötehosta 20 % on loistehon osuudesta ilmaista sekä loistehon syöttö verkkoon on kiellettyä. Helen verkkoyhtiössä loistehon ottomaksun laskutus määräytyy kuukauden suurimmasta mitatusta loistehon otosta, josta on vähennetty 40 % saman

kuukauden suurimmasta pätötehosta tai vähintään 50kAVr. Turku energialla loistehomaksuun lukeutuu pien- ja keskijänniteverkossa vain loistehon otto. Loistehon ottomaksu määräytyy kuukausittaisesta loistehohuipusta, josta on vähennetty 20 % saman kuukauden pätötehoaiipun määrästä. (turkuenergia.fi 2022; helensähköverkko.fi 2020; lahtienergia.fi 2022.)

Vuonna 2023 mittausjakson pituus on siirtymässä tunnista 15-minuutin taseselvitysjaksoon eli varttitaseeseen. Säästökykyisen tuotannon vähentyessä tarvitaan reaaliaikaisempaa ja luotettavampaa sähkömarkkinamallia, jotta energian tuotanto ja kulutus pysyvät tasapainossa. Käytännössä hinnoittelu tulisi perustumaan viidentoista minuutin energiankulutuksen mukaan, jolloin tasepoikkeamisten kompensointi tulee ajankohtaisemmaksi ja joustavuudesta palkitaan. Latausasemien kannalta varttitaseeseen siirtyminen tarkoittaa, että mittausjakson tarkentuminen lisää huipputeho ilmaantumisaikojen määrää. Latausasemalla energiankulutus voi olla hetkellisesti hyvinkin korkea, jolloin mittausjakson lyhentyminen tuo useammin näkyville korkean kulutuksen hetket. (fingrid.fi 2022.)

Sähkönhintaan kuuluu sähkönsiirron lisäksi sähköenergian kulutus, joka muodostuu kulutusmaksusta (snt/kWh) ja perusmaksusta (€/kWh). Sähköenergian kulutukseen on tarjolla mm. määräaikaista kiinteän hinnan sopimuksia ja pörssisähkönhintaan perustuvia sopimuksia. Tässä työssä tarkastellaan pörssisähköön perustuvaa hinnoittelua.

6.1.1 Laskentamallin muodostaminen

Sähkönsiirtohinna saataisiin muodostamalla energiankulutuksen mittausdatasta kahden kuukauden keskiarvo, koko vuoden suurin huipputeho tai Helen sähköverkkoyhtiön tapauksessa ottamalla datasta suurin tunnin keskitehoarvo koko vuodelta, ja laskemalla paljonko sähkönhankinta tulisi kustantamaan verkkopalveluhinnaston perusteella. Kustannusta ilman energiavarastoa verrattaisiin kustannuksiin, joissa energiavarasto on vähentämässä huipputehon määrää.

Tässä työssä ei oteta loistehosta muodostuvia kustannuksia huomioon, eikä laskennassa ei oteta huomioon siirtomaksusta tulevia kustannuksia.

Taulukko 2 Verkkoyhtiöiden verkkopalvelumaksut (voimassa 1.5.2022 alkaen)

Sähköverkkoyhtiö	Tehomaksun määrä €/kW,kk	Loistehomaksun määrä €/kvar,kk	Perusmaksu €/kk	Siirtomaksu snt/kWh
Lahti Energia	2,13 €	3,00 €	62,00 €	1,67 snt
Turku Energia	3,22 €	2,18 €	136,40 €	0,84 snt
Helen Verkkoyhtiö	5,58 €	2,84 €	217,00 €	1,09 snt

Laskennassa käytetään alv. 24 % arvoa, sillä sähkövero peritään kaikesta jakeluverkon kautta asiakkaalle jaetusta sähköenergiasta, ellei asiakas harjoita tuotannollista toimintaa, konesalitoimintaa tai ammattimaista kasvihuoneviljelyä. (helensähköverkko.fi 2020.)

Turku energian tehomaksu määräytyy vuoden kahden suurimman huipputehon keskiarvo kerrottuna tehomaksulla 3,22 €/kW. Kaavaksi muodostuu tällöin:

$$\frac{Huipputeho_1 + Huipputeho_2}{2} \times 3,22 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \quad (2)$$

Helen verkkoyhtiöllä tehomaksun laskemiseen voidaan käyttää kaavaa:

$$Keskiteho \times 5,58 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \quad (3)$$

Lahtienergian tehomaksun laskemiseen voidaan käyttää kaavaa:

$$Huipputeho \times 2,13 \frac{\text{€}}{\text{kW}} \quad (4)$$

Vuosittainen säästö mikä voidaan tehdä energiavarastolla (EV) voidaan laskea kaavalla:

$$\text{Säästö} = (\text{Huipputeho}_{\text{ilman EV}} - \text{Huipputeho}_{\text{EV:n kanssa}}) \times \text{tehomaksu} \times 12\text{kk} \quad (5)$$

Sähköenergian hinnasta saatu hyöty voidaan laskea siten, että päivä- ja yö hinnalle lasketaan keskiarvoinen erotus jota käytetään energiankulutus aineiston kanssa sähköenergian hinnan säästön laskemiseen. Kun tiedetään paljonko päivähinta on likimäärin yö hintaa kalliimpaa, voidaan laskea paljonko akku tekee säästöä päivässä kertomalla hintaerotus akun koolla. Akun kapasiteetti määrittää paljonko sähköä voidaan kuluttaa päivähinnan sijasta yö hinnalla. Päivä- ja yö hinnan erotuksen keskiarvon laskemiseen tilastoin vuoden 2022 jokaisen kuukauden yhdeltä viikolta sähköpörssi Nordpoolissa määrättyneen päivä- ja yö spot-hinnan, josta laskin niiden keskiarvoisen erotuksen. Erotukseksi sain (13,14snt/kWh). Sähköenergian kustannushyödyssä täytyy ottaa huomioon sähköenergian perusmaksu, joka useimmiten on 0–6€/kk (sähkön kilpailutus n.d). Tässä työssä käytetään sähköenergian perusmaksuna 3€/kk.

7 Tulokset

Tuloksissa akkuvaraston oletettiin kestävän 2000–3000 lataussykliä tai 10–15-vuotta, ja akun C-arvo oli 2 sekä akkuvaraston kustannuksissa käytettiin hintaa (639€/kWh). Laskuissa käytettiin 100kWh ja 200kWh akkua.

Sähkönkulutuksen/siirron kustannukset on esitetty kappaleessa 6.1.1 laskentamallin muodostaminen. Huipputehon tarkastelussa käytettiin mittausjaksona varttitasetta eli 15-minuutin ajanjaksoa.

7.1 Sähköenergian kulutuksesta saatu hyöty

Tilannetta jossa akkuvarasto voisi tuoda säästöjä sähkönkulutuksesta muodostuvissa kustannuksissa, täytyy saada erotus yö- ja päiväsähkön hinnasta, joka on (13,14snt/kWh). Akkuvaraston oletettiin olevan joka päivä käytössä jolloin kulutuksesta muodostuva säästö tuli vuoden jokaiselta päivältä. Alla olevalla kaavalla voidaan laskea paljonko kustannussäästöjä akkuvarasto pystyisi tuomaan vuodessa:

$$\text{Akun kapasiteetti (kWh)} * 13,14 \frac{\text{snt}}{\text{kWh}} * 365\text{pv} \quad (6)$$

Akkuvarasto pystyisi tuomaan säästöjä vuodessa 100kWh akkuvarastolla 4 796€ ja 200kWh akkuvarastolla 9 556€. Kulutuskustannuksista saatavat säästöt otetaan huomioon laskettaessa huipputehosta saatavissa säästöissä, ja se on myös otettu huomioon taulukoissa 3–5.

7.2 Aineiston tarkastelu

Tätä työtä varten saatiin toimeksiantajalta aineistoa latausaseman energiaprofiileista, jotta laskentatilannetta voidaan aidosti havainnollistaa. Aineisto antoi dataa kolmen latausaseman maksimaalisesta tehosta suhteessa aikaan eli kuinka paljon maksimaalista tehoa (kW) latausasema on tarjonnut

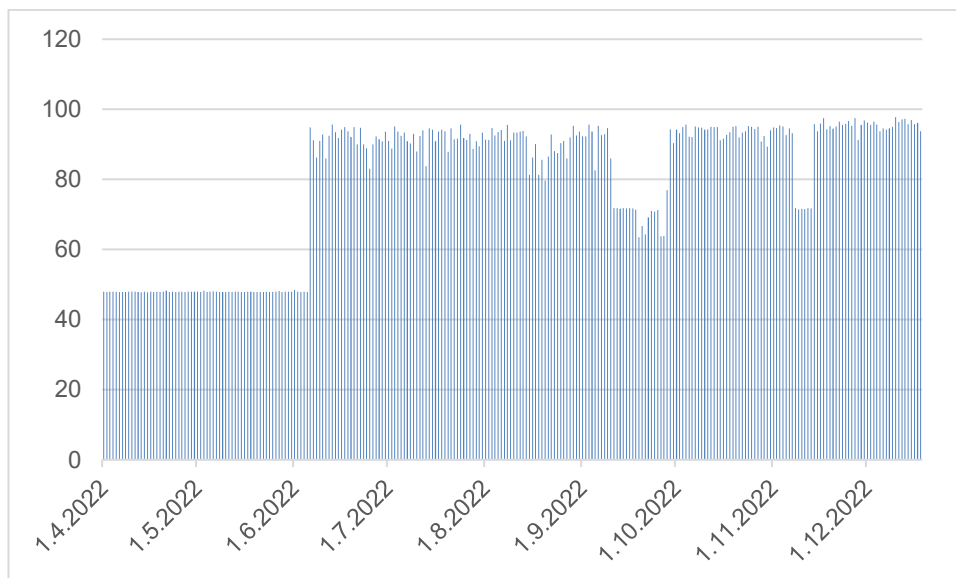
juuri tarkastelun kohteena olevalla ajalla. Tarkastelutarkkuuden pystyi määrittelemään joko 15-sekunnista yhteen päivään.

Kyseistä dataa varten on tehty salassapitosopimus, jolloin kaikki mahdollinen luottamuksellinen tai sisäpiiritieto on jätetty työstä pois. Työstä on jätetty pois latausasemien todellinen sijainti ja latausenergian tarjoaja.

Tapauksissa tarkastellaan paljonko säästöä olisi voitu tehdä, jos tarkasteltavassa latausasemassa olisi käytetty energiavarastoa leikkaamassa huipputehoa. Tarkastelua lähdettiin toteuttamaan muodostamalla kaavio kuvastamaan viimeisen vuoden energiankulutusta ja ottamalla suurimmat 10-prosentin tehopiikit tarkasteltavaksi. Suurimpia tehopiikkejä lähdettiin testaamaan laskennallisoin keinoin, kuinka paljon huipputehoa kyetään leikkaamaan, jos käytössä on 100kW tai 200kW akkuvarasto. Akkuvaraston kapasiteetin leikkauskyky sovitettiin tarkasteluun, siten että data säädettiin 15-minuutin tehotarkastelutarkkuuteen ja laskettiin paljonko akkuvarasto kykenee leikkaamaan huipputehoa. Esimerkkinä jos 3-tunnin aikana latausasema syöttää jatkuvasti eri suuruista tehoa, niin lasketaan paljonko akkuvarasto kykenee tarjoamaan tehoa ilman, että kulutusteho ylittää akun kapasiteetin.

Kun saatiin selville määrä kuinka paljon huipputehoa kyetään leikkaamaan, niin laskettiin mahdolliset kustannushyödyt käyttämällä jo mainittua kolmen sähköverkkoyhtiön palveluhinnastoa. Kustannushyödyistä laskettiin akkuvaraston takaisinmaksuaika ja sen tuottama säästö sähkölaskussa 10-vuoden ja 15-vuoden aikana.

Kuvassa 8 on 100kW latausaseman datasta muodostettu 9-kuukauden kaavio, jossa maksimaalinen teho (kW) on kuvattuna vasemmalla ja aika alapuolella. Kuvasta voidaan tulkita, että suuria kulutushuippuja ei kaaviossa ole, jolloin huipputehon leikkaus ei toisi paljoa kustannushyötyjä. Kaaviossa ensimmäiset 2-kuukautta latausaseman tehonsaatavuus on ollut vain 50kW ja kulutus erittäin tasaista.



Kuva 8 Datasta muodostettu kaavio 100kW latausasemasta

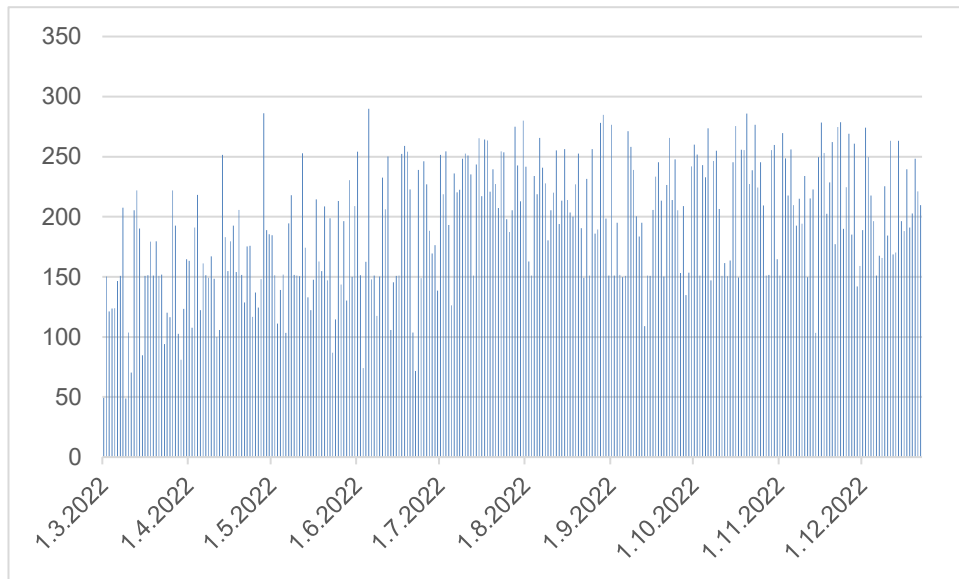
Alla olevassa latausasemassa 1 tehonsaatavuus on melko pieni, jolloin suuria tehopiikkejä ei synny. Myös energiankulutuksen keskihajonta on pieni, mikä tarkoittaa, että kulutus on hyvin tasaista. Kyseisen tapauksen kohdalla kumpikaan akkuvaraston kapasiteetti vaihtoehto ei olisi kannattava 10-vuoden aikana, sillä se ei maksaisi itseään takaisin. Latausasemalle akkuvarasto ei olisi kannattava, sillä hyödyt ovat hyvin pieniä. Kustannushyödyt on pienimmät kolmesta tarkasteltavasta olevasta latausasemasta.

Taulukko 3 Latausasema teholtaan 100kW

Latausasema 1:

Akun koko	100kW	Kulutuksen keskihajonta	8,03
Huipputeho	97,72kW	Huipputeho akun kanssa	84kW
Sähköverkkoyhtiö	Takaisinmaksuaika, vuotta	10-vuoden säästöt	15-vuoden säästöt
Lahti Energia	12	-12 741,05 €	12 838,43 €
Turku Energia	12	-11 004,74 €	15 442,89 €
Helen Verkkoyhtiö	12	-11 638,58 €	14 492,12 €
Akun koko	200kW	Kulutuksen keskihajonta	8,03
Huipputeho	97,72kW	Huipputeho akun kanssa	76kW
Sähköverkkoyhtiö	Takaisinmaksuaika, vuotta	10-vuoden säästöt	15-vuoden säästöt
Lahti Energia	13	-26 686,37 €	23 870,45 €
Turku Energia	12	-23 890,60 €	28 064,10 €
Helen Verkkoyhtiö	12	-24 966,14 €	26 450,78 €

Kuvassa 9 voidaan nähdä, että teholtaan 300kW latausasemassa kulutushuippuja syntyy huomattavasti enemmän kuin pienempi tehoisessa latausasemassa. Kaavion perusteella akkuvarasto toisi potentiaalisesti kustannushyötyjä huipputehon leikkauksessa. Latausaseman dataa tutkiessa huomattiin huipputeho hetkien olevan lyhytkestoisempia kuin latausaseman 3, jolloin kaavio muodosti energiankulutuksen suhteen terävämpiä kärkiä.



Kuva 9 Datasta muodostettu kaavio 300kW latausasemasta

Alla olevassa latausasemassa 2 on melko suuri tehonsaatavuus, jolloin suuret tehopiikit ovat huomattavasti todennäköisempiä. Sen voi huomata keskihajonnasta mikä on huomattavasti suurempi kuin latausasemassa 1. Kyseisen tapauksen kohdalla vain 100kW akkuvarasto Turku Energian hinnastolla olisi kannattava 10-vuoden aikana. Kyseisessä tapauksessa akkuvarasto toisi suurimmat kustannushyödyt kolmesta tarkastelun kohteena olevista latausasemista.

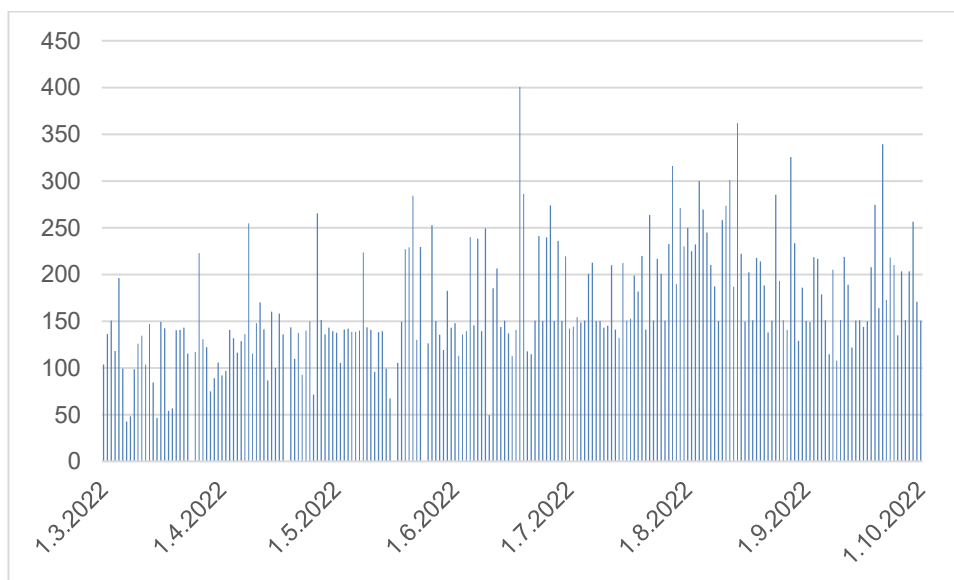
Tapauksessa ilmeni, että huipputehoa on vaikeampi leikata 200kW akkuvarastolla enemmän. Sillä mitä enemmän tavoitteena on leikata huipputehoa, sitä enemmän ilmenee tapauksia, jossa tavoiteltu huipputeho ylittyy. Akkuvaraston tuoma hyöty rajoittuu kapasiteetti kykyyn.

Taulukko 4 Latausasema teholtaan 300kW

Latausasema 2:

Akun koko	100kW	Kulutuksen keskihajonta	56,68
Huipputeho	289,99kW	Huipputeho akun kanssa	242,99kW
Sähköverkkoyhtiö	Takaisinmaksuaika, vuotta	10-vuoden säästöt	15-vuoden säästöt
Lahti Energia	11	-4 285,80 €	25 521,30 €
Turku Energia	10	1 098,66 €	33 597,99 €
Helen Verkkoyhtiö	10	-563,40 €	31 104,90 €
Akun koko	200kW	Kulutuksen keskihajonta	56,68
Huipputeho	289,99kW	Huipputeho akun kanssa	210,99kW
Sähköverkkoyhtiö	Takaisinmaksuaika, vuotta	10-vuoden säästöt	15-vuoden säästöt
Lahti Energia	11	-12 045,60 €	45 831,60 €
Turku Energia	10	-2 475,54 €	60 186,69 €
Helen Verkkoyhtiö	10	-5 788,80 €	55 216,80 €

Kuvassa 10 latausasemalla voidaan nähdä suuria kulutushuippuja, etenkin päivämäärällä 18.6.2022 oleva 400,63kW huipputeho. Latausaseman dataa tutkiessa huipputehoa oli huomattavasti vaikeampi leikata akkuvarastolla kuin latausaseman 2, sillä energiankulutus oli huipputeho hetkellä oli pidempi kestoista.



Kuva 10 Datasta muodostettu kaavio 450kW latausasemasta

Alla olevasta latausasemasta 3 nähdään kokonaisteholtaan suurempi latausasema kuin edelliset tarkasteltavat asemat. Myös latausasemassa on kaikista suurin keskihajonta kulutuksessa.

Taulukko 5 Latausasema teholtaan 450kW

Latausasema 3:

Akun koko	100kW	Kulutuksen keskihajonta	63,48
Huipputeho	400,64kW	Huipputeho akun kanssa	356,64kW
Sähköverkkoyhtiö	Takaisinmaksuaika, vuotta	10-vuoden säästöt	15-vuoden säästöt
Lahti Energia	11	-5 052,60 €	24 371,10 €
Turku Energia	11	-6 767,86 €	21 798,20 €
Helen Verkkoyhtiö	10	-1 567,80 €	29 598,30 €
Akun koko	200kW	Kulutuksen keskihajonta	63,48
Huipputeho	400,64kW	Huipputeho akun kanssa	340,64kW
Sähköverkkoyhtiö	Takaisinmaksuaika, vuotta	10-vuoden säästöt	15-vuoden säästöt
Lahti Energia	12	-16 902,00 €	38 547,00 €
Turku Energia	11	-16 574,70 €	39 037,96 €
Helen Verkkoyhtiö	11	-12 150,00 €	45 675,00 €

8 Yhteenveto

Työn päätavoitteena on selvittää, että onko energiavarastolla kuten esimerkiksi akulla mahdollista luoda sähkölatausjärjestelmästä kustannustehokkaasti kannattavampi, sekä esitellä akun ja sähkölatausjärjestelmän toimintaa. Työssä lähdettiin tutkitun tiedon perusteella selvittämään kannattavin akkuvaihtoehto energiavarastolle ja tarkastelemaan sen ominaisuuksia. Kannattavin akku energiavarastolle on litiumioniakku, joka on jo käytössä lähes kaikissa suuren kapasiteetin vaativissa tehtävissä. Tarkalleen ottaen litiumioniakuista LFP-akku osoittautui kannattavaksi suuren käyttöiän ja C-purkausarvon perusteella. NMC-akku osoittautui kannattavimmaksi myös suuren käyttöiän ja sen suuren ominaisenergian perusteella.

Työn päätavoitetta lähdettiin tutkimaan selvittämällä latausasemassa käytettävän akun ominaisuuksia, kuten kustannuksia, käyttöikää sekä mahdollisia akun tuomia ongelmia. Kun akun kustannukset ja sähköverkkopalveluhinnasto oli selvillä, työtä varten otettiin kolme tilannetta sähkölatausaseman energiankulutuksesta. Tiedoista laskettiin työn tavoitteen selvittämiseksi vaativat tiedot, jotka havainnollistettiin taulukkoihin.

Tuloksena voidaan todeta, että energiavarastolla on mahdollista saada sähkölatausasema kustannuskannattavamaksi vain niillä ehdoilla, että energiankulutuksen keskihajonta on mahdollisimman suuri, energiavaraston kyky leikata huipputehoa suhteessa sen hintaan on kannattava, sekä akkuvaraston käyttöikä on vähintään 15-vuotta. Vain latausasema 3 oli Turku Energian hinnalla kannattava 10-vuoden jälkeen.

Energiavaraston voidaan kuitenkin todeta olevan vielä liian kallis, jotta se toisi suuria kustannushyötyjä.

Huomioitavaa tuloksissa oli myös, että sähköverkkoyhtiöiden palveluhinta vaikutti energiavaraston kannattavuuteen. Kahdessa tapauksessa Turku Energian sähkönhinta toi suurimmat kustannushyödyt, koska vuoden kahdella suurimmalla huipputeholla ei ollut suurta eroa. Suurin tehomaksun hinta, joka oli

Helen sähköverkkoyhtiöllä, tarkoitti yhdelle latausasemista kustannuskannattavinta tulosta energiavarastolle.

Tällä hetkellä litiumioniakkujen hinta on noussut inflaation, sekä akkukomponenttien ja raaka-aineiden hintojen nousun vuoksi, mikä tarkoittaa heikkoa kannattavuutta energiavarastojen kannalta. Kuitenkin BloombergNEF, joka on arvioinut litiumioni akkujen markkinoita vuodesta 2010 arvioi tuoreessa 2022 tutkimuksessa litiumioniakkujen hinnan putoavan alle \$100/kWh vuoteen 2026 mennessä. (Henze 2022.)

8.1 Tutkimuksen luotettavuus

Tutkimuksessa on käytetty mahdollisimman laajasti luotettavia ja tuoreita lähteitä, jotta laskennassa käytetyt arvot kuvastaisivat todellisuutta. Aihe pohjautuu tulevaisuudessa käytettävään varttitaseeseen, jolloin muutoksen myötä työn tutkimustieto on vielä käytettävissä.

Ongelmaksi muodostui vaihteleva tieto akun ominaisuuksista, kuten sen kustannuksista. Myös sähkönkulutuksesta muodostettu keskiarvo yö- ja päivähinnan erotukselle on likimääräinen, jolloin arvossa on tarkkuusvaihtelevuutta. Sähkönkulutuksesta muodostettu keskiarvo voi vaihdella, sillä sähkön pörssihinta ei ole kiinteä vaan se voi vaihdella eri vuonna. Sähkönkustannusten laskennassa huomioimatta jätettiin sähkönsiirtohinnan sisältämä siirtomaksu sekä loistehonmaksu. Tutkimuksessa on myös jätetty huomioimatta akun ikääntymisestä johtuva kapasiteetin heikkeneminen.

Tutkimus pyrkii antamaan ymmärrettävän käsityksen mitä mahdollisuuksia energiavarasto voi tuoda ja minkälaisissa tilanteissa se olisi kannattava, kun halutaan sähkölatausasemasta kustannuskannattavampaa.

8.2 Mahdolliset jatkotutkimusaiheet

Kyseisessä tutkimuksessa ei ole lähdetty tarkastelemaan elektronista ratkaisua, kuinka akku olisi liitetty sähkölatausjärjestelmään, sekä miten se vastaisi huipputehon leikkauksesta. Aihe antaisi mahdollisesti laajemman kuvan kuinka paljon häviötä syntyy, kun sähköenergia tuodaan akulta latausasemaan ja kuinka se teknisesti olisi mahdollista.

Aihetta pystyisi laajentamaan ottamalla tarkasteluun energiavarastoon liitetyn pientuotannon huomioon, kuten esimerkiksi aurinkosähkön. Tällöin akun tarvitsema energia saataisiin sähköverkon sijasta pientuotannosta. Tapausta olisi myös mahdollista simuloida, jolloin akkuvaraston kyky leikata huipputehoa tulisi paremmin esiin.

Energiavarastoilla on tärkeä tulevaisuus, kun sähkönkulutus kasvaa ja halutaan varmistaa toimiva ja taajuudeltaan tasainen sähköverkko. Energiavarastoja voitaisiin käyttää samoin, kun jo suunniteltua V2G (vehicle to grid) menetelmää, jossa sähköautojen akusta saatavilla olevaa sähköenergiaa pystytään käyttämään sähköverkossa.

Lähteet

ABB. 2021. Introduction to Energy Storage Solutions. Viitattu 14.9.2022.

Energiavarastojen esitysmateriaali. Osoitteessa:

<<https://new.abb.com/medium-voltage/packaging-and-solutions/energy-storage-solutions>>

Abcasemat.fi n. d. Sähköautonlataus|dynaaminen tehojako. Viitattu

10.10.2022. Verkkajulkaisu. Osoitteessa:

<<https://www.abcasemat.fi/artikkelit/abc-lataus-dynaaminen-tehonjako>>

Atmaja, T. 2015. Energy storage system using battery and ultracapacitor on mobile charging station for electric vehicle. Energy Procedia, 68, 429-437.

BatteryUniversity.com [1] 2021. BU-204: How do lithium batteries work?

Viitattu 20.9.2022. Battery University verkkomateriaali. Osoitteessa:

<<https://batteryuniversity.com/article/bu-204-how-do-lithium-batteries-work>>

BatteryUniversity.com [2] 2021. BU-205: Types of lithium-ion. Viitattu

26.9.2022. Battery University verkkomateriaali. Osoitteessa:

<<https://batteryuniversity.com/article/bu-205-types-of-lithium-ion>>

Borah, R; Hughson, F; Johnston, J; Nann, T. 2020. On battery materials and methods. Materials Today Advances, 6, 100046.

Clement-Nys, K; Hasen, E; Driesen, J. 2010. Impact of charging plug-in hybrid vehicles on residential distribution grid.

Csiszár, C. 2019. Demand Calculation Method for Electric Vehicle Charging Station Locating and Deployment.

Energia.fi n. d. Sähköverkkoyhtiöt. Viitattu 16.10.2022. Energiateollisuuden verkkomateriaali.

Osoitteessa:<<https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/sahkoverkot/sahkoverkkoyhtiöt>>

Farmer, C; Hines, P; Dowds, J. 2010. Modeling impact of increasing PHEV loads on the distribution system infrastructure.

Fingrid n.d. Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso. Viitattu 3.11.2022.

Fingrid verkkomateriaali osoitteessa:

<<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/#kysymyksia-ja-vastauksia>>

Gerbracht, H; Most, D; Fichtner, W. 2010. Impacts of plug-in electric vehicles on Germany's power plant portfolio – a model-based approach. In: Proceedings of the 7th International Conference on the European Energy Market (EEM), Madrid, Spain

Hadley, S. 2007 Evaluating the impact of plug-in hybrid electric vehicles on regional electricity studies. In: Proceedings of the VII. Bulk Power System Dynamics and Control (iREP) Symposium, Charleston, SC.

Halonen, T. 2011. Sähköliittymän toimitusprosessi. Opinnäytetyö (AMK). Sähkötekniikan koulutusohjelma, sähkövoimatekniikka. Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 17.10.2022.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/26972/Halonen_Tommi.pdf?sequence=1

Hänninen, H; Karppinen, M; Leskelä, M; Pohjakallio, M. 2019. Tekniikan kemia s.147. Edita Publishing Oy, 1415.

Helensahkoverkko.fi 2020. Hinnastot ja ehdot. Viitattu 16.10.2022. Helen sähköverkkoyhtiön verkkomateriaali. Osoitteessa:

<<https://www.helensahkoverkko.fi/palvelut/hinnastot>>

Henze, V. 2021. Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite. Viitattu 27.9.2022. Verkkojulkaisu.

Osoitteessa: <<https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/>>

Henze, V. 2022. Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh. Viitattu 26.12.2022. Verkkojulkaisu osoitteessa: <<https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>>

Kempower.com 2022. Charging solutions. Viitattu 16.9.2022. Kempower verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://kempower.com/charging-solutions/#>>

Kintner-Meyer, M; Schneider, K; Pratt, R. 2007. Impacts assessment of plug-in hybrid electric vehicles on electric utilities and regional U.S. power grids, technical analysis. In: Proceedings of the 10th Annual Energy, Utility & Environment Conference (EUEC), Tucson, AZ.

Lahtienergia.fi 2022. Hinnastot ja sopimusehdot. Viitattu 16.10.2022. Lahti energia sähköverkkoyhtiön verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://www.lahtienergia.fi/hinnastot-ja-sopimusehdot/>>

Laki liikenteessä käytettävien vaihtoehtoisten polttoaineiden jakelusta 28.6.2017/478

Lizhi, W. 2008. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on locational marginal prices. In: Proceedings of the IEEE Energy 2030 Conference, Atlanta, GA.

Manthiram, A. 2017. An Outlook on Lithium Ion Battery Technology. ACS Central Science, 3(10), 1063–1069.

Merrill, L; Rosenberg, S; Jungjohann, K; Harrison, K. 2021. Uncovering the Relationship between Aging and Cycling on Lithium Metal Battery Self-Discharge. ACS Applied Energy Materials, 4(8), 7589-7598.

Mertanen, A 2022. Sähköliittymien mitoitusvertailu ja optimointi. Opinnäytetyö (AMK). Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma. Savonia-ammattikorkeakoulu.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/752142/Mertanen_Aleksi.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Mpoweruk.com. 2005a. State of Charge (SOC) Determination. Viitattu 26.9.2022. verkkomateriaali. Osoitteessa:

<[https://www.mpoweruk.com/soc.htm#:~:text=As%20the%20battery%20disc harges%20the,to%20the%20state%20of%20charge](https://www.mpoweruk.com/soc.htm#:~:text=As%20the%20battery%20disc%20harges%20the,to%20the%20state%20of%20charge)>

Mpoweruk.com. 2005b. Cell Chemistries - How Batteries Work. Viitattu 26.9.2022. verkkomateriaali. Osoitteessa:

<[https://www.mpoweruk.com/soc.htm#:~:text=As%20the%20battery%20disc harges%20the,to%20the%20state%20of%20charge](https://www.mpoweruk.com/soc.htm#:~:text=As%20the%20battery%20disc%20harges%20the,to%20the%20state%20of%20charge)>

Nowak, J. 2021. Kulutushuippujen tasaaminen akuston avulla. Diplomityö. Automaatiotekniikan DI-tutkinto-ohjelma. Tampereen yliopisto.

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/130390/NowakJan-Peter.pdf;jsessionid=CA2AB9BB4F02E16E1BAA2CCE39852C0E?sequence=2>

Orrberg, M; Linja-Aho, V. 2019. Sähköautot ja latausjärjestelmät. Sähköinfo. ST-käsikirja 41.

Powertechsystems. n.d. Lithium-Ion State of Charge (SoC) measurement. Viitattu 5.1.2023. Powertech verkkojulkaisu. Osoitteessa:

<<https://www.powertechsystems.eu/home/tech-corner/lithium-ion-state-of-charge-soc-measurement/>>

Power-sonic.com. 2020. What is a battery c rating. Osoitteessa:

<<https://www.power-sonic.com/blog/what-is-a-battery-c-rating/>>

Rahman, S; Shrestha, G. 1993. An investigation into the impact of electric vehicle load on the electric utility distribution system. IEEE Trans. Power Delivery 8: 591–597.

Ramasamy, V; Zuboy, J; O’Shaughnessy, E; Feldman, D; Desai, J; Woodhouse, M; Basore, P; Margolis, R. 2022. U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2022. Golden, CO: National Renewable Energy

Laboratory. NREL/TP-7A40-83586.

<https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83586.pdf>.

Saiyid, A. 2022. Grid storage systems unlikely to see price declines until 2024: IHS Markit. Verkkojulkaisu. Osoitteessa:

<<https://cleanenergynews.ihsmarkit.com/research-analysis/grid-storage-systems-unlikely-to-see-price-declines-until-2024.html>>

Sasaki, T; Ukyo, Y; Novák, P. 2013. Memory effect in a lithium-ion battery. Nature Materials, 12(6), 569–575. Osoitteessa:

<<https://doi.org/10.1038/nmat3623>>

Science.org. 2016a. How a battery works. Viitattu 15.9.2022. Australian academy of science verkkomateriaali. Osoitteessa:

<<https://www.science.org.au/curious/technology-future/batteries>>

Science.org. 2016b. Types of batteries. Viitattu 23.9.2022. Australian academy of science verkkomateriaali. Osoitteessa:

<<https://www.science.org.au/curious/technology-future/battery-types>>

Science.org. 2016c. Lithium-ion batteries. Viitattu 27.9.2022. Australian academy of science verkkomateriaali. Osoitteessa:

<<https://www.science.org.au/curious/technology-future/lithium-ion-batteries>>

Solarfactory.fi 2021. Sähkövarasto latauspisteiden yhteydessä. 6.10.2022.

Solarfactory verkkojulkaisu. Osoitteessa: <<https://solarfactory.fi/wp-content/uploads/2021/09/Sahkovarasto-latauspisteiden-yhteydessa-20200228.pdf>>

Solarips.com 2021. BATTERY STORAGE 101: What is depth of discharge? Viitattu 27.9.2022. Independent power systems verkkomateriaali.

Osoitteessa: <[https://www.solarips.com/blog/2021/january/battery-storage-101-what-is-depth-of-discharge-/->](https://www.solarips.com/blog/2021/january/battery-storage-101-what-is-depth-of-discharge-/)

Stek.fi 2021. Sähköautot yleistyvät – miten ja missä sähköauto ladataan ja mitä lataaminen maksaa? Viitattu 3.10.2022. Verkkojulkaisu. Osoitteessa:

<<https://stek.fi/energiatehokkuutta-sahkolla/sahkoautoilu#:~:text=S%C3%A4hk%C3%B6autojen%20akkuja%20on%20teknisesti%20mahdollista,laturi%20on%20melko%20kallista%20teho%20elektroniikkaa>>

Sähkön kilpailutus.fi n.d. Mistä sähkösovimuksen perusmaksu koostuu? Viitattu 6.1.2023. Verkkajulkaisu. Osoitteessa: <<https://www.sahkon-kilpailutus.fi/kuukausimaksuton-sahkosopimus/#:~:text=Useimmiten%20perusmaksun%20osuus%20on%200,eik%C3%A4%20se%20vaihtelee%20s%C3%A4hk%C3%B6nkulutuksen%20omukaan.>>>

Tribioli, L; Bella, G. 2021. Automotive hybrid electric systems: Design, modeling, and energy management. Hybrid Technologies for Power Generation, 279–312.

Turkuenergia.fi 2022. Verkkopalveluhinnasto. Viitattu 16.10.2022. Turku energia sähköverkkoyhtiön verkkomateriaali. Osoitteessa: <<https://www.turkuenergia.fi/sahkoverkot/tietoa-sahkoverkostamme/sahkonjakelutuotteet-hinnastot-ja-sopimusehdot/verkkopalveluhinnasto/>>

Wehinger, L; Galus, M; Andersson, G. 2010. Agent-based simulator for the German electricity wholesale market including wind power generation and widescale PHEV adoption. In: Proceedings of the IEEE European Electricity Markets Conference (EEM), Madrid, Spain.

Wehinger, L; Hug-Glanzmann, G; Galus, M. 2011. Assessing the effect of storage devices and a PHEV cluster on German spot prices by using model predictive and profit maximizing agents. In: Proceedings of the Power Systems Computation Conference (PSCC), Stockholm, Sweden.

Wikipedia.org 2022. Lithium-ion battery. Viitattu 26.9.2022. Wikipedian verkkomateriaali. Osoitteessa: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery>