
**KYSYNTÄJOUSTO AKKUPOHJAISISSA
ÄLYKKÄISSÄ SÄHKÖVERKOISSA**




Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö

Automaatiotekniikan koulutusohjelma

Valkeakoski, kevät 2017

Juha-Pekka Rantanen

Juha-Pekka Rantanen



Valkeakoski
Automaatiotekniikan koulutusohjelma

Tekijä	Juha-Pekka Rantanen	Vuosi 2017
Työn nimi	Kysyntäjousto akkupohjaisissa älykkäissä sähköverkoissa	
Työn ohjaaja	Raine Lehto	

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyö toteutettiin valmistavan teollisuuden yritykselle. Työn tavoitteena oli tuottaa yleiskuva markkinoilla olevista sähköenergian akkupohjaisista varastointimahdollisuuksista, joita voitaisiin soveltaa suuremmissa aurinkopaneelivoimaloissa ja mahdollisesti muissakin uusiutuvan energian sähköjärjestelmissä. Oleellisena osana tähän kokonaisuuteen liittyi myös kantaverkon kysyntäjoustoperäisen toimintaperiaatteen selvitys ja toteutus mahdollisuudet akkuteknologian avulla sekä kysyntäjoustoperäisyyden kannattavuuden selvitys.

Työn tarkoitus oli tehdä selvitys nykytilanteesta. Selvitys tehtiin toimittajakenttää tutkimalla ja heidän tarjontaan tutustumalla. Tärkeä osa selvitystyötä oli myös verkkojulkaisuihin ja uusiin innovaatioihin tutustuminen. Suomessa suuremmissa mittakaavassa sähköenergian akkupohjainen varastointi on vielä hieman vieras käsite ja siten laajaa tarjontaa ja käyttökokemuksia ei ole.

Selvitystyön perusteella suurien sähkövarastojen valmistajia ei löydy Suomesta, mutta niin kutsuttuja sähköenergiavarastoja on saatavilla kyllä Euroopasta ja muualta maailmasta. Yleisesti selvitystyön perusteella voidaan vetää yhteenvedo, että energiavarastojen yleistymisen hidasteena on ollut korkea hankintahinta ja nykyisellään pelkästään akustoon varastoidulla sähköenergialla ei saada kustannustehokasta, luotettavaa ja varsinkaan pitkäkestoista kysyntäjoustoperäistä tarjontaa johtuen vuorokauden- ja vuodenaajoista sekä säätilojen vaihtelusta. Toisaalta voidaan ajatella, että useassa tapauksessa esimerkiksi varavoimajärjestelmä voitaisiin korvata kokonaan sähköenergiavarastolla, joten jokaisessa tapauksessa pitää asiaa tarkastella juuri kyseisen kohteen näkökulmasta tarpeet huomioiden.

Avainsanat Sähkövarasto, sähköenergiavarasto, kysyntäjousto

Sivut 36 s.

Valkeakoski
Automation Engineering

Author	Juha-Pekka Rantanen	Year 2017
Subject of Bachelor's thesis	Demand response at battery based smart grids	
Supervisor	Raine Lehto	

ABSTRACT

This thesis was made for a manufacturing company. The aim was to provide an overview to the market of battery-based storage possibilities and to search for possibilities to use battery storage with major solar power plants and also with other renewable energy power systems. An essential part of this thesis was providing an overview to the grid demand response concept and finding possibilities to use grid demand response with the storage technology of battery based energy.

The purpose of the thesis was to give an overview of the current situation. The thesis was implemented by examining possible suppliers and their products. An important part of the project was also on lining literature in the field and learning about new innovations. In Finland, on a larger scale, battery-based electric energy storage is still somewhat a foreign concept, and thus a wide offering and user experience was not available for this project.

Based on the outcomes of this thesis large scale battery based energy storage manufacturers are not available in Finland, but they are available in Europe. As a conclusion of the thesis project it can be stated that the spread of large scale energy storages has been slow because of a high initial cost level. A battery based energy storage is not cost-effective and reliable because of the variation depending on time of the day, annual seasons and weather conditions. On the other hand, it is conceivable that in many cases, for example, an emergency power system could completely be replaced with a battery based energy storage, so each case must be individually examined from the point of view of the requirements in each case.

Keywords Energy storage, electric energy storage, demand response.

Pages 36 p.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	1
2	SÄHKÖENERGIAN AKKUPOHJAINEN VARASTOINTI	2
2.1	Erilaiset akkuteknologiat.....	4
2.2	Sähkökemialliset akut	6
2.2.1	Lyijyakut.....	8
2.2.2	Nikkeli-kadmiumakut.....	8
2.2.3	Nikkeli-metallihydridiakut	9
2.2.4	Litiumakut	9
2.3	Virtausakut	10
2.3.1	Vanadiini-redoksivirtausakut	11
2.3.2	Sinkki-halogeenivirtausakut	12
2.4	Natriumakut.....	13
2.4.1	Natrium-rikkiakut	13
2.4.2	Natrium-metallikloridiakut.....	14
2.5	Superkondensaattorit.....	14
2.6	Akkuteknologian tulevaisuuden kehityssuunta.....	15
3	ÄLYKÄS SÄHKÖVERKKO	18
3.1	Älykkään sähköverkon toimintaperiaate.....	20
3.2	Älykkään sähköverkon sovellukset ja mahdollisuudet	21
3.3	Teollisuus 4.0 osana älykästä sähköverkkoa.....	22
4	KYSYNTÄJOUSTO	23
4.1	Kysyntäjoustoperintaperiaate.....	24
4.2	Markkinapaikat ja ansaintamallit	24
4.3	Käytännön sovellukset	26
5	AKKUTEKNOLOGIA KYSYNTÄJOUSTOSSA	28
5.1	Erilaiset akustoratkaisut	28
5.2	Investointikustannukset ja kannattavuus.....	31
6	YHTEENVETO	33
	LÄHTEET	35

1 JOHDANTO

Tässä insinööriyössä käsitellään sähköenergian varastointia akkuteknologialla ja tutkitaan, että voidaanko akkuteknologialla toteutettuja suuria sähköenergiavarastoja mahdollisesti käyttää kustannustehokkaasti hyödyksi kysyntäjoustopaikoilla. Työn tarkoituksena on tuottaa yleiskuva erilaisista akkuteknologioista ja akkuteknologialla toteutetuista sähkövarastoista sekä kartoittaa sähkövarastojen mahdollisuutta olla osana kysyntäjoustopaikoja tarjoavaa joustavaa älyverkkoa.

Uusiutuvan energian lisääntynyt käyttötarve ja kustannusten aleneminen on selkeästi tuonut sähkömarkkinoille uuden haasteen. Sähköverkko varsinkin Suomessa on ollut aiemmin luotettava sähkötarjoaja riippumatta vuorokauden ajasta ja kulloinkin tarvittavasta tehosta pois lukien muutamat sähköverkon pääosin säästä johtuvat poikkeustilanteet. Uusiutuvan energian lisääntyvä käyttö on kuitenkin luonut tarpeen varastoida tuotantohuippu aikana tuotettavaa sähköenergiaa ja vastaavasti käyttää sähköenergiaa varastosta kulutushuippujen tasaamiseen. Sähköenergian varastoinnin tarve korostuu erityisesti uusiutuvan energian varastoinnissa, koska karkeasti ajateltuna tulisi päivällä saada varastoitua sähköenergiaa myös yön ja mahdollisesti pilvisen päivän tarpeisiin, jotta varastoinnista saataisiin mahdollisimman suuri hyöty. Vastaavasti tuulivoiman käytön yhteydessä tiedetään, että kalenterivuodessa on paljonkin lähes tuulettomia päiviä, jolloin tuulivoimalla ei saada tuotettua merkittävästi sähköä.

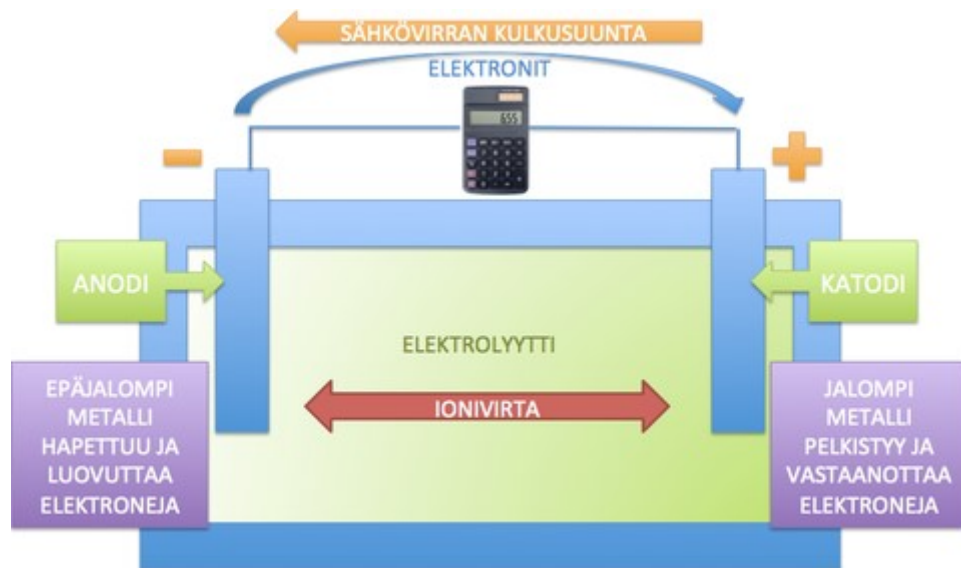
Sähköenergian varastointi on Suomessakin tuttua, mutta lähinnä pienikokoisissa kesämökkijärjestelmissä tai muuten varauskapasiteetiltaan pienekokoisissa järjestelmissä. Kesämökkijärjestelmissä sähköenergian varastointi on tyypillisesti toteutettu lyijyakuilla ja sähköenergian tuottaminen on toteutettu tuuligeneraattorilla tai aurinkosähköpaneelilla. Pienissä järjestelmissä varsinkin kesämökeillä on valintaperuste ollut usein halpa hinta verrattuna sähköverkon sähköliittymään ja helppo asennettavuus. Lisäksi kesämökeillä kulutushuiput ajoittuvat juuri tuotantohuippujen kanssa samaan vuoden aikaan eli kesään.

Sähköverkon epävakaas ja lisääntyvä uusiutuvan energian käyttö ovat tuoneet uusia haasteita sähköverkon rakenteelle. Hetkittäiset huipputehon tarpeet saattavat olla suuria ja vastaavasti taajuudet saattavat vaihdella. Sähköverkkoa vakauttamaan on luotu kysyntäjoustopaikojärjestelmä. Kysyntäjoustopaikojärjestelmän perusajatuksena on, että toimijat tarjoavat sähköverkkoon vakautusreserviä joko huipputehosen tasaamiseen tai taajuuden vakauttamiseen. Kysyntäjoustopaikoissa on erilaisia ansaintamalleja, jotka soveltuvat erilaisille järjestelmille. Yksinkertaisimmillaan kyseessä voi olla esimerkiksi varavoimakone tai vastaavasti kyseessä voi olla suuri aurinkosähkövoimajakokonaisuus akustoinen.

2 SÄHKÖENERGIAN AKKUPOHJAINEN VARASTOINTI

Sähköenergiaa voidaan varastoida erilaisiin sähköpareihin, akkuihin ja akustoihin. Tarvittaessa sähköenergiaa voidaan vastaavasti myös purkaa akustoista myöhempänä ajankohtana. Akkuteknologiaa on tyypillisesti hyödynnetty kohteissa, jotka eivät ole järkevästi kytkettävissä sähköverkkoon tai on haluttu muutoin varmistaa sähköenergian katkeamaton saatavuus (esim. sairaalat, mobiililaitteet, ajoneuvot ja UPS-järjestelmät). Nykyisin akkuteknologiaa hyödynnetään myös osana sähköverkkoa esimerkiksi taajuusvaihteluiden kompensointiin ja kulutushuippujen tasaamiseen.

Akut muodostuvat sähköpareista. Sähköparin toiminta perustuu kemiallisen energian hyödyntämiseen sähkövirran synnyttämiseksi. Sähköparissa on kaksi metallista elektrodia ja niiden välissä elektrolyytineste kuten kuvassa 1 havainnollistetaan. Kemiallisessa reaktiossa elektrolyytin kanssa toisella elektrodilla (katodi) tapahtuu pelkistymistä ja se varaa elektroneja. Vastaavasti toisella elektrodilla (anodi) tapahtuu hapettumista ja elektroneja vapautuu. Tämän kemiallisen hapettumis ja pelkistymisreaktion seurauksena anodi varautuu negatiivisesti ja katodi varautuu positiivisesti ja näin elektrodien välille syntyy jännite. Syntyneen jännitteen suuruus riippuu metallisten elektrodilevyjen materiaalista. (Linden & Reddy 2001, 1.3.)



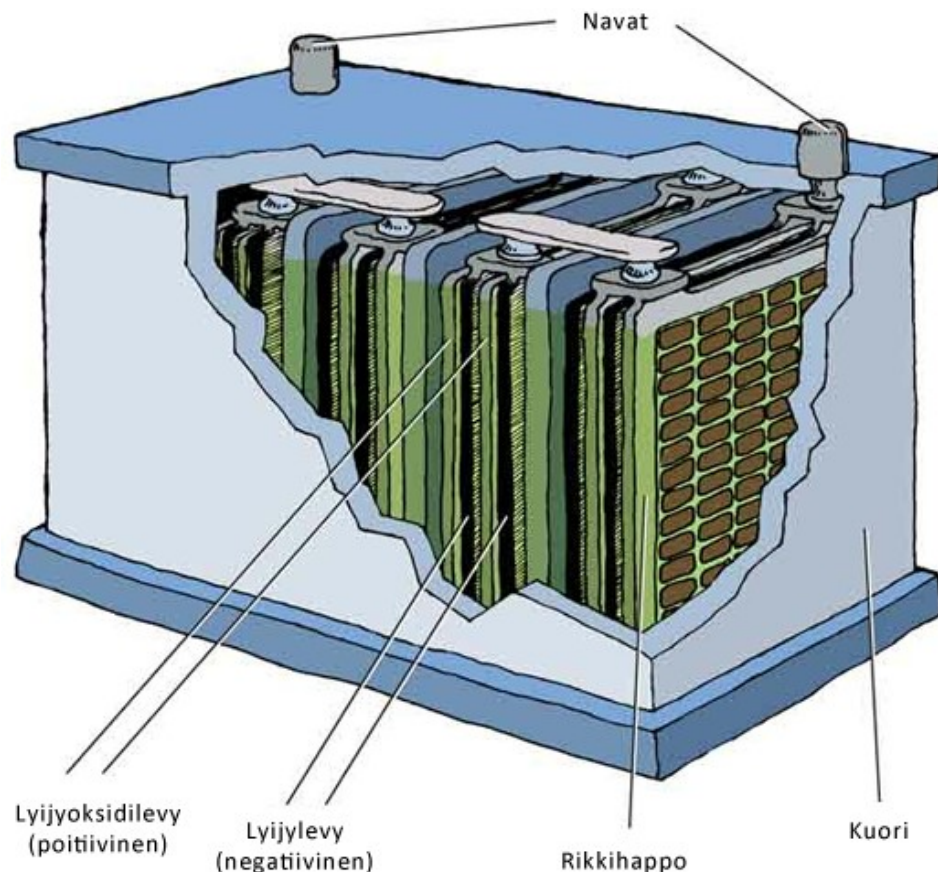
Kuva 1. Sähköparin toimintaperiaate (Wikispaces n.d.).

Akku koostuu useammasta sähköparista ja akustolla tarkoitetaan useampaa rinnan tai sarjaan kytkettyä akkua. Varattavia sähköpareja, akkuja ja akustoja voidaan varata niihin sähkövirtaa johtamalla, eli päinvastaisella reaktiolla sähkövirran purkamiseen verrattuna. Akkuteknologiassa akku nimitetään tyypillisesti käytettävien elektrodien mukaan.

Henkilöautossa käytetään käynnistysakkuna 12 voltin lyijyakkua, jossa sekä positiivinen elektrodilevy (katodi) että negatiivinen elektrodilevy (anodi) ovat lyijyä ja elektrolyytinä (ionijohde) käytetään rikkihappoa.

Henkilöauton 12 Voltin lyijyakku koostuu kuudesta sarjaan kytketystä sähköparista, jota havainnollistetaan kuvassa 2. Raskaissa ajoneuvoissa on yleensä 24 Voltin sähköjärjestelmä ja se koostuu kahdesta sarjaan kytketystä 12 Voltin akusta.

Akkujen kokonaisvarauskapasiteetti ilmoitetaan tyypillisesti ampeeritunteina(Ah). Eurooppalaisen akkunormin EN50342 mukaisesti varauskapasiteetti ilmoitetaan 20 tunnin purkausaikana. Esimerkiksi mikäli 12V akkua voidaan purkaa 5 ampeerin kuormitusvirralla 20 tunnin ajan ilman, että yksittäisen kennon kennojännite putoaa alle 1,75V / kenno, ilmoitetaan akun varauskapasiteetiksi $5A \times 20h = 100Ah$. Yhtämittaisen 20 tunnin kuormituksen jälkeen 12 Voltin akun kuormituksen jälkeinen jännite putoaa lopparvoon 10,5V. EN50342 normin mukaiset mittaukset tehdään +25°C lämpötilassa, joka siis ei välttämättä kerro riittävän tarkasti akun soveltuvuutta esimerkiksi kylmiin olosuhteisiin. Ajoneuvoteollisuudessa käytetään akun varauskapasiteetin ilmaisuun myös CCA-arvoa (Cold Crank Amps) kylmäkäynnistysvirtaa, joka akusta on saatavissa -18°C lämpötilassa. On siis tärkeää tietää myös, että minkä standardin mukaisesti varauskapasiteetti on ilmoitettu, koska eri standardien mukaisesti tehdyt mittaukset ja niiden tulokset eivät ole suoraan sellaisenaan vertailukelpoisia. (Exide 2016)



Kuva 2. 12 Voltin lyijynesteakku koostuu useasta sähköparista (Polar Heater n.d.).

2.1 Erilaiset akkuteknologiat

Akulla tarkoitetaan tässä yhteydessä sekundääriparistoa, jossa tapahtuu primäärireaktio ja sekundäärireaktio. Akun purkauksen aikana tapahtuvassa primäärireaktiossa vapautuu sähköenergiaa ja käänteisesti sekundäärireaktiossa purkauksessa vapautuneet yhdisteet sitoutuvat kemiallisesti akkuun. Käänteisten reaktioiden vuoksi akku on mahdollista myös varata uudelleen. Paristoissa ei tapahdu sekundäärireaktiota samalla tavalla vaan reaktiotuotteet esimerkiksi saattavat sitoutua imeytymällä kennon materiaaleihin. Tästä syystä pariston uudelleen varaus ei ole mahdollista.

Elektroniikka laitteet kuten älypuhelimet ja kannettavat tietokoneet ovat olleet osittain suunnan näyttäjinä akkuteknologian kehityssuunnan vaatimuksille. Laitteiden suorituskyky on kehittynyt tasaisesti paremmaksi koko ajan ja samalla tehonkulutus on vastaavasti pienentynyt. Tästä huolimatta edelleen akkuteknologialta vaaditaan koko ajan enemmän suorituskykyä ja kapasiteettia fyysisen koon samalla pienentyessä.

Markkinoilla on tällä hetkellä useita erilaisia akkuteknologioita erilaisiin käyttötarkoituksiin ja tuotekehityksen mukana tulee markkinoille koko ajan myös uusia innovaatioita. Nykypäivänä monen sähköisen laitteen käyttöä ja kehittymistä rajoittaakin juuri akkuteknologia. Akkuteknologian valinta tulee aina tehdä juuri kyseiseen kohteeseen sopivalla tavalla huomioiden juuri kyseisen tarpeen vaatimukset. Akuston käyttötarkoituksesta riippuen painoarvo voi olla esimerkiksi pienissä valmistuskustannuksissa, pitkässä käyttöiässä, luotettavuudessa tai suuressa hetkellisessä huipputehossa.

Sähköautoissa sähköenergian varastointi on ollut aina haaste, joka on rajoittanut omalta osaltaan sähköautojen kehitystä. Mobiililaitteisiin verrattuna sähköautoissa on aivan eriluokan varastointitarve ja se tuo omat haasteensa. Sähköautossa akuston varauskyky pitää olla riittävän suuri ja latausaika pitää olla kohtuullinen. Vertauksena sopivaksi latausajaksi on käytetty polttoaineella toimivan henkilöauton tankkaukseen kuluvaa aikaa ja tästä ollaan nykypäivän sarjatuotantoautoilla aika kaukana. Mainittakoon tässä yhteydessä esimerkkinä sähköauto Tesla model S, jolla 30 minuutin Supercharge-latauksella saavutetaan 270 km lisää toimintasädettä. (Tesla Motors 2016)

Akkuteknologioiden kehittämiseen on keskitytty yksityisellä sekä valtiollisella tasolla. Yleisesti voidaan todeta, että kehitys on ollut viime vuosina verrattain nopeaa ja painetta teknologioiden kehittämiseen on edelleen. Esimerkiksi päivällä auringosta aurinkopaneeleilla kerättävää sähköenergiaa on tarve varastoida illan ja yön käyttöä varten. Suuri läpimurto vielä puuttuu kustannustehokkaan akkuteknologian osalta, mutta erilaisia kehityshankkeita on maailmalla käynnissä.

Teknologian kehittyessä ja markkinoiden tarpeiden muuttuessa myös suuremmat akustokokonaisuudet ovat tulleet markkinoille. Uusiutuvan energian tarpeet ja erityisesti taajuusvaihteluiden kompensointi tietyissä kohteissa ovat edistäneet varauskapasiteetiltaan suurempien akustojen kehitystä ja hankkeiden edistymistä.

Kuvassa 3 näkyy Helenin syksyllä 2016 Helsingin Suvilahden valmistunut sähkövarasto. Kyseinen sähkövarasto on Landis+Gyrin ja Toshiba yhteistyössä valmistama. Investointikustannuksiltaan noin kahden miljoonan euron sähkövaraston nimellissähköteho on 1,2 MW ja varauskapasiteetti 0,6 MWh. (Helen 2016.)



Kuva 3. Helsingin Suvilahden sähkövarasto. (Helen 2016.)

Valmistumishetkellä pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä Fortumin voimalaitoksella maaliskuussa 2017. Kuvassa 4 näkyvän Fortumin sähkövaraston nimellissähköteho on 2,0 MW ja varauskapasiteetti 1,0 MWh. Fortumin järjestelmä on investointikustannuksiltaan noin 1,6 miljoonaa euroa ja akku koostuu 6600:sta litium-ioni kennosta. Sähkövaraston on toimittanut Fortumille Ranskalainen Saft. Fortumin mukaan Järvenpään akkuprojekti täydentää tulevaisuuden ratkaisujen kuten kysyntäjoustopuun ja virtuaalivoimalaitosten tutkimusta Fortumissa. (Fortum 2017)



Kuva 4. Fortumin Järvenpään Sähkövarasto (Fortum 2017).

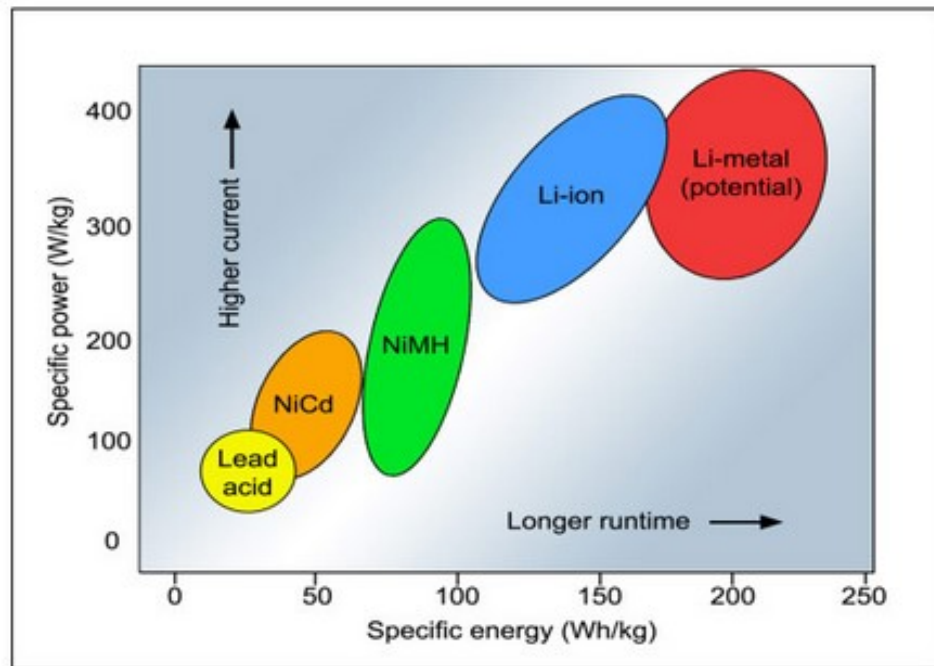
Uusiutuvan energian varastoinnin yhteydessä yleisimmin käytössä on sähkökemiallisia akkuja, kuten Suomessa sijaitsevilla sähkövarastoissakin,

mutta esimerkiksi virtausakustoista on saatu lupaavia testituloksia ja järjestelmien koon kasvaessa vaihtoehtoisen akkuteknologioiden uskotaan yleistyvän.

2.2 Sähkökemialliset akut

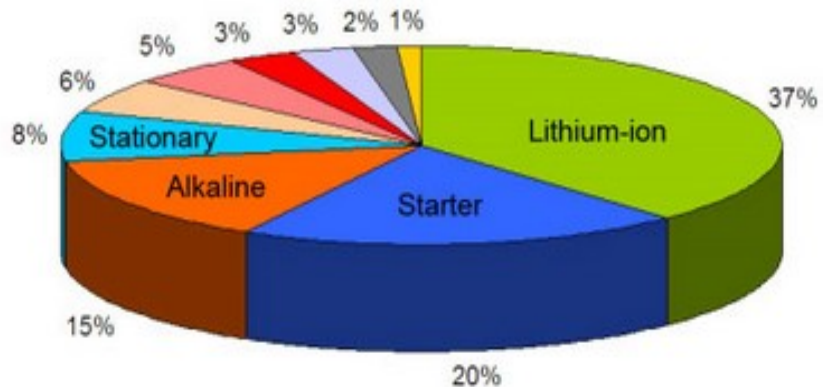
Sähkökemiallisten akkujen toimintaperiaatteena on muuttua varautuessaan sähköenergia kemialliseksi energiaksi ja vastaavasti purkautuessaan muuttaa kemiallinen energia takaisin sähköenergiaksi. Tyypillinen galvaaninen akkukkenno koostuu anodista, katodista ja elektrolyytistä. Tavoitellusta akkukennoston jännitteestä riippuen akussa voi olla useita kennoja. Akkuja valmistetaan eri materiaaleista ja luokittelu voidaan tehdä esimerkiksi elektrolyyttien, rakenteen, ominaisuuksien tai käyttötarkoituksen mukaan. Akkujen erilaisia merkittäviä ominaisuuksia ovat muun muassa elektrolyytti, sisäresistanssi, kennojännite, itsepurkautumisnopeus, lataus/purkauskertojen määrä sekä teho- ja energiatiheys. Sähkökemiallisista akuista yleisimpiä tyyppisiä ovat lyijy-, nikkeli- ja erilaiset litiumpohjaiset akut.

Sähkökemiallisia akkuja tarkastellessa voidaan akut jakaa perinteisiin akkuihin ja litiumakkuihin. Lisäksi vielä perinteiset akut voidaan jakaa niissä olevan elektrolyytin mukaan kahteen ryhmään; happoakkuihin, joissa elektrodit ovat lyijyä ja lipeäakkuihin, joissa elektrodit ovat nikkeliä, rautaa, kadmiumia tai metallihydridiä. Sähkökemiallisten akkujen käyttöikä vaihtelee akkutyypeittäin rakenteesta ja käytettävistä materiaaleista johtuen. Käyttöikä on tyypillisesti riippuvainen lataus- ja purkukertojen määrästä. Latauskertojen laskennan yhteydessä syklillä tarkoitetaan yhtä lataus- ja purkukertaa. Syklisen käyttöikä katsotaan olevan lopussa, kun akun varautumiskyvystä on jäljellä noin 80% alkuperäisestä varautumiskyvystä. Sähkökemiallisten akkujen teho- ja energiatihedät jakautuvat pääsääntöisesti akuissa käytetyn materiaalin mukaisesti, jota havainnollistetaan kuvassa 5.



Kuva 5. Akkutyypin tehoitehdet (W/kg) ja energiitehdet (Wh/kg) (Batteryuniversity verkkojulkaisu 2016).

Toinen tapa tutkia sähkökemiallisten akkujen jakaamaa markkinoilla on elektrolyytin ja käyttötarkoituksen mukaan tehtävä jako, joka selviää kuvasta 6.



- 37% Lithium-ion
- 20% Lead acid, starter battery
- 15% Alkaline, primary
- 8% Lead acid, stationary
- 6% Zinc-carbon, primary
- 5% Lead acid, deep-cycle
- 3% Nickel-metal-hydride
- 3% Lithium, primary
- 2% Nickel-cadmium
- 1% Other

Kuva 6. Akkutyypin jakautuminen elektrolyytin ja käyttötarkoituksen mukaan (Batteryuniversity 2016).

Akkujen lataus- ja purkunopeus on riippuvainen elektrodin materiaalista ja elektrolyyttinä käytettävästä aineesta, jotka määrittävät ionien siirtymisnopeuden. Akun energian varastointi kyky riippuu myös materiaaleista. Mitä enemmän elektrodi voi varata ioneja, sitä enemmän energiaa voidaan akkuun varastoida.

2.2.1 Lyijyakut

Lyijyakku (Pb) on akkutyypinä vanha, mutta silti edelleen käytössä monessa paikassa. Lyijyakun tyypillinen käyttötarkoitus on esimerkiksi ajoneuvossa käynnistysakkuna tai UPS-järjestelmissä. Lyijyakun käyttöä rajoittaa verrattain suuri paino. Lyijyakun etuina ovat edullisuus ja hyvä tehoteho (600W/kg). Vastaavasti rajoittavina tekijöinä ovat pieni energiatiheys (35 Wh/kg), itsepurkautuvuus ja huonohko kylmäkestävyys. Lyijyakusta on kehitelty myös paranneltu PbC-versio, jossa tavallisen lyijyoksidielektrodin parina on superkondensaattori. PbC-akun etuina ovat lyhyempi latausaika sekä tavalliseen lyijyakkuun verrattuna pidempi elinikä. PbC-akun ominaisuuksien johdosta sovelluskohteita ovat erityisesti aurinko- ja tuulivoimaenergian lyhytaikainen varastointi ja hybridiajoneuvojen akut. Tyypillisiä lyijyakkukennon ominaisuuksia on kuvattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Lyijyakkukennon ominaisuuksia (Linden & Reddy 2001, 6.10.).

Lyijyakkukennon tyypillisiä ominaisuuksia	
Nimellisjännite (V)	2.0
Energiatiheys (Wh/kg)	35
Energiatiheys (Wh/l)	70
Käyttöikä (vuosia)	3-8
Lataussyklien kesto	200-250

2.2.2 Nikkelikadmiumakut

Nikkeliakuista nikkelikadmiumakku (NiCd) on akkutyypinä myöskin vanha keksintö lyijyakun tavoin ja edelleen käytössä esimerkiksi akkukäyttöisissä sähkötyökaluissa. Nikkelikadmiumakulle ominaista on suuri latauskertojen kesto, suuri virranantokyky ja laaja käyttölämpötila-alue. Käyttöä rajoittavina tekijöinä ovat kadmiumin myrkyllisyys, nikkelikadmiumakulle ominainen muistiefekti ja verrattain suuri itsepurkautuvuus. EU:n alueella on rajoitettu vuoden 2009 syyskuusta alkaen kadmiumin käyttöä ja tästä syystä kadmiumia sisältävien akkujen käyttö vähenee koko ajan. Nikkelikadmiumakku on vanhimpia edelleen markkinoilla olevia akkutyyppejä. Tyypillisiä Nikkeli-Kadmiumakun ominaisuuksia on kuvattu taulukossa 2.

Taulukko 2. Nikkeli-kadmiumakkukennon ominaisuuksia (Linden & Reddy 2001, 6.10.).

Nikkeli-kadmium kennon tyypillisiä ominaisuuksia	
Nimellisjännite (V)	1.2
Energiatiheys (Wh/kg)	35
Energiatiheys (Wh/l)	100
Käyttöikä (vuosia)	4-6
Lataussyklien kesto	400-500

2.2.3 Nikkeli-metallihydridiakut

Nikkeli-metallihydridiakku (NiMH) on tullut osittain korvaamaan nikkeli-kadmiumakkuja. NiMH-akussa on NiCd-akkuun verrattuna noin kaksi kertaa suurempi energitiheys ja muistiefekti ei ole yhtä vahva kuin NiCd-akussa. Ominaisuuksiltaan NiMH-akku soveltuu hyvin esimerkiksi mobiililaitteisiin ja NiMH-akku on käytössä laajalti myös hybridiajoneuvojen tehonlähteinä. Toinen nikkelikadmiumakun rinnalla tullut korvaava akkutyyppe on litiumpolymeeriakku joka myös mahdollistaa suuren purkuvirran. Tyypillisiä Nikkeli-metallihydridiakun ominaisuuksia on kuvattu taulukossa 3.

Taulukko 3. Nikkeli-metallihydridiakun ominaisuuksia (Linden & Reddy 2001, 6.10.).

Nikkeli-metallihydridi kennon tyypillisiä ominaisuuksia	
Nimellisjännite (V)	1.2
Energiatiheys (Wh/kg)	75
Energiatiheys (Wh/l)	240
Käyttöikä (vuosia)	4-6
Lataussyklien kesto	400-500

2.2.4 Litiumakut

Litium-pohjaiset akut edustavat uudempaa akkuteknologiaa. Litium-ioni akkuja on käytössä erityisesti mobiililaitteissa. Litium-ioni akuille ominaista on suuri energitiheys suhteessa painoon, muisti-ilmiötä ei ole, kapasiteetti ei alene vaikka lataus olisi epäsäännöllistä, akku ei juurikaan lämpene latautuessaan ja latausaika voi olla lyhyt. Haasteiksi on tunnistettu litiumin epävakaas ja tästä johtuvat ongelmat. Muita mainittavia rajoittavia tekijöitä ovat pakkasesta johtuvat tehon menetys, kuten NiMH-akullakin ja akun vanheneminen, vaikka akkua ei käytettäisiinkään. Litium-ioni akun

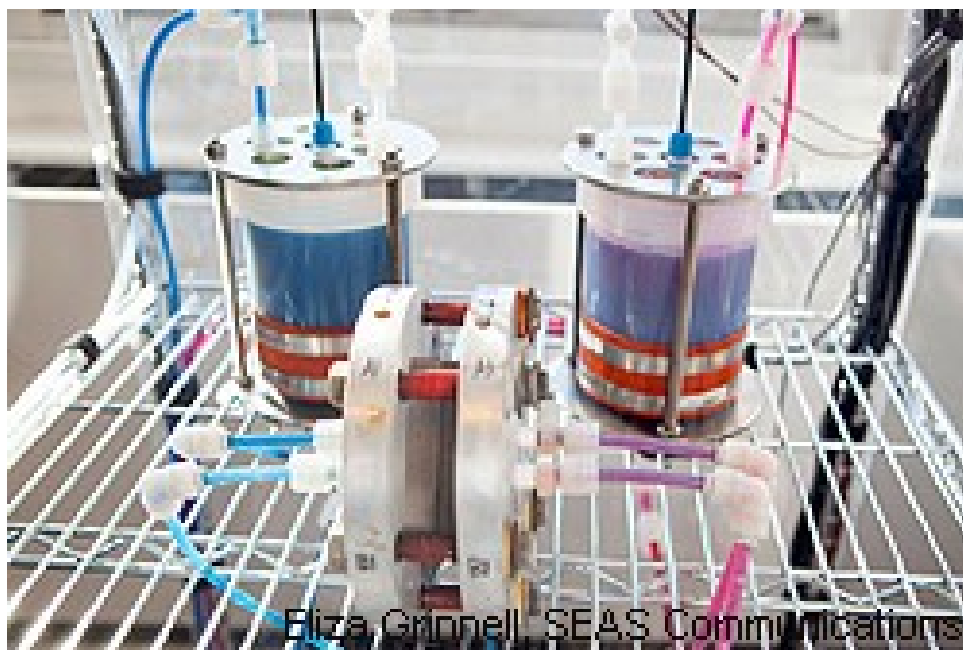
kennojännite on korkeampi kuin muilla akkutyypeillä, tyypillisesti 3,2V – 3,7V. Tyypillisiä Litiumakkujen ominaisuuksia on kuvattu taulukossa 4.

Taulukko 4. Litiumakkujen ominaisuuksia (Linden & Reddy 2001, 6.10.).

Litium-ioni kennon tyypillisiä ominaisuuksia	
Nimellisjännite (V)	4.1
Energiatiheys (Wh/kg)	150
Energiatiheys (Wh/l)	400
Käyttöikä (vuosia)	5
Latausyhtymien kesto	1000

2.3 Virtausakut

Virtausakkujen toimintaperiaatteena on varastoida energiaa nesteeseen ja varastoida energiaa sisältävä neste erilliseen säiliöön. Pumput kierrättävät elektrolyyttinestettä elektrodien ja sähkökemiallisen kalvon välistä. Varautunut neste varastoidaan erilliseen säiliöön. Tässä on etuna, että neste ei ole itse akun rakenteessa ja tämä mahdollistaa sähkökemialliseen muuntamiseen tarvittavan laitteiston ja varastointisäiliöiden toisistaan riippumattoman mitoituksen. Tämä mitoituksen riippumattomuus saattaa tuoda etua esimerkiksi järjestelmän päivityksissä muuttuneiden tarpeiden vuoksi. Virtausakuissa voidaan suurissa järjestelmissä varastoida halvemmalla energiaa kuin perinteisissä sähkökemiallisissa akuissa. Erityisesti tämä suurien järjestelmien kustannustehokkuus on herättänyt tutkijoiden kiinnostuksen virtausakustoja kohtaan. Kuvassa 7 on kuvattuna virtausakku laboratorio-oloissa.



Kuva 7. Virtausakusto laboratoriossa (Nanobittejä 2014).

Virtausakut toimivat hapetus-pelkistysreaktiolla ja virtausakkujen yleisty-
misen jarruttajana on ollut niiden huono energiatiheys ja siitä johdannainen
suuri fyysinen koko. Energia varastoidaan virtausakuissa metalli-ioneihin,
jotka ovat liuenneena elektrolyytinesteeseen.

2.3.1 Vanadiini-redoksivirtausakut

Käytetyin virtausakku on vanadiini-redoksivirtausakku, jota löytyy markki-
noilta useamman valmistajan valmistamana. Ominaisuuksiltaan vanadiini-
redoksi-virtausakku poikkeaa sähkökemiallisista akuista paljon. Haasteena
ovat matalampi energiatiheys ja kennojäännite, lisäksi teholtiheys verrattuna
esimerkiksi lyijyakkuun on alhaisempi. Elektrolyytti on vanadiini-redoksi-
akuissa käytännössä ikuinen ja huoltotarve esiintyy ainoastaan mekaanisesti
kuluviissa osissa. Suuremmissa akustoissa hinta/kWh alenee akun koon kas-
vaessa, lisäksi latausaika on lyhyt joka parantaa käyttömahdollisuuksia esi-
merkiksi uusiutuvan energian varastointiin. Kyseisessä akkutyypissä elekt-
rolyytti voidaan vaihtaa ja näin elektrolyyttiä vaihtamalla pikalataus on
myös mahdollista. Taulukossa 5 on kuvattu tyypillisiä vanadiini-redoksi
virtausakun ominaisuuksia.

Taulukko 5. Vanadiini-redoksivirtausakun ominaisuuksia (Linden & Reddy 2001, 37.14.).

Vanadiini-redox akun tyypillisiä ominaisuuksia	
Nimellisjännite (V)	1.4
Teoreettinen kapasiteetti (Ah/kg)	21
Teoreettinen kapasiteetti (Wh/kg)	29

2.3.2 Sinkki-halogenivirtausakut

Sinkki-halogenivirtausakuissa negatiivisena elektrodina toimii metallinen sinkki ja positiivisena elektrodina on halogeeniliuos (kloori tai bromi). Tunnetuimmat sinkki-halogenivirtausakut ovat sinkki-klooriakku ja sinkki-bromiakku. Sinkki-klooriakulla on korkeampi energiatiheys, mutta haasteeksi käytännön sovelluksissa on havaittu kaasumaisen kloorin vapautuminen varausreaktiossa. Tästä johtuen sinkki-klooriakku vaatii liuoksen jäähdyttämisen, joka osaltaan asettaa rakenteellisia rajoituksia. Sinkki-bromiakussa tarvetta jäähdytykselle ei ole ja lisäksi bromin käsittely on helppompaa. Taulukossa 6 on kuvattu tyypillisiä sinkki-halogenivirtausakun ominaisuuksia.

Taulukko 6. Sinkki-halogenivirtausakun ominaisuuksia (Linden & Reddy 2001, 37.14.).

Sinkki-halogeni virtausakun tyypillisiä ominaisuuksia	
Nimellisjännite (V)	1.83
Teoreettinen kapasiteetti (Ah/kg)	238
Teoreettinen kapasiteetti (Wh/kg)	429

Yksi markkinoilla saatavilla olevista malleista on kuvassa 8 nähtävä Redflow ZBM2 Sinkki-bromi virtausakusto.



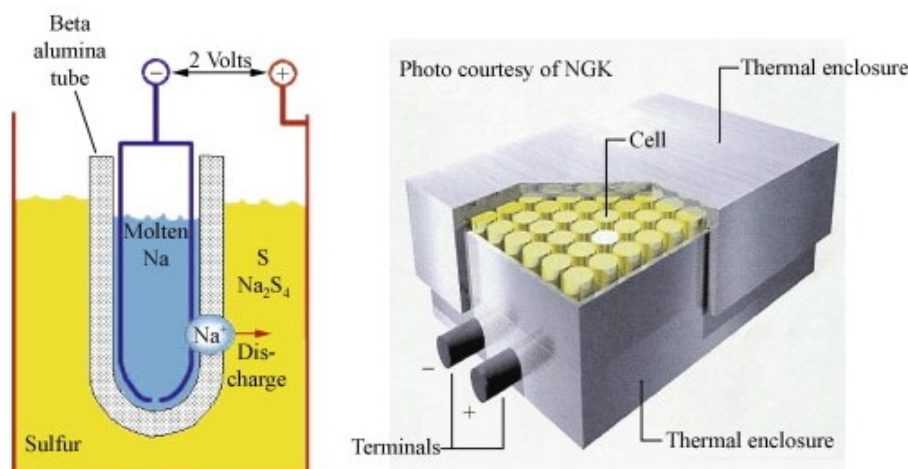
Kuva 8. Redflow ZBM2 10 kWh Sinkki-bromivirtausakusto (Redflow Limited 2017).

2.4 Natriumakut

Natriumakut ovat korkeassa lämpötilassa toimivia akkuja ja tästä syystä poikkeavat rakenteensa vuoksi muista akuista. Toimintalämpötila natriumakuille on 300-400°C riippuen elektrolyytistä ja muista ominaisuuksista. Negatiivisena elektrodina käytetään alkalimetallia, tyypillisesti litiumia tai natriumia. Alkalimetallisesta elektrodista johtuen vesipohjaisia elektrolyyttejä ei voida käyttää, sillä alkalimetallit reagoivat voimakkaasti veden kanssa. Vesipohjaisten elektrolyyttien tilalla käytetään esimerkiksi liuselektrolyyttejä, suolasulaa tai kiinteitä elektrolyyttejä. Alkalimetalleja elektrodeina käytettäessä on mahdollista saavuttaa korkeammat energiatiheddet. Natrium on verrattain kevyttä ja esimerkiksi natrium-rikkiakun teoreettinen energiatiheys on noin 750 Wh/kg. Eli noin kolminkertainen verrattuna lyijyakuun. Korkeasta lämpötilasta johtuvat akkutyypin kennostot ovat hyvin eristettyjä ja näin ollen korkean lämpötilan ylläpito vaatii verrattain vähän energiaa. Vastaavasti korkeasta lämpötilasta johtuen tulipalon vaara on olemassa ja rakenteisiin on kiinnitettävä erityisen paljon huomiota. Natriumakuissa tutkijoita kiinnostavat erityisesti halvat ja helposti saatavat valmistukseen tarvittavat raaka-aineet.

2.4.1 Natrium-rikkiakut

Natrium-rikkiakussa (NaS) negatiivinen elektrodi on sulaa natriumia ja positiivinen elektrodi on sulaa rikki-natrium-polysulfidiseosta. Elektrolyytinä natrium-rikkiakussa on kiinteässä muodossa oleva β -alumina, jossa aktiivisena on Na-ioni. Natrium-rikkiakun rakenne selviää kuvasta 9. Joissakin yhteyksissä natriumakkuja kutsutaan myös beeta-akuiksi elektrolyytistä johdannaisena. Akun toiminnan kannalta kiinteä elektrolyytti vaatii toimiaukseen korkean lämpötilan. Normaali käyttö-lämpötila natrium-rikkiakulle on noin 310 – 350 °C. Korkea lämpötilavaatimus johtuu elektrolyytistä, joka saavuttaa ioninjohtokyvyn noin 300 °C lämpötilassa. Akku ei toimi alle 310 °C asteen lämpötilassa eli akun toiminnan säilyttämiseksi tulee lämpötila pysyä korkeana, vaikka akku ei varattaisi tai kuormitettaisikaan ollenkaan.



Kuva 9. Natrium-rikkiakun rakenne koostuu kenoista ja lämpöeristeestä (Research Gate 2017).

2.4.2 Natrium-metallikloridiakku

Natrium-metallikloridiakku tunnetaan myös ZEBRA-akkuna. ZEBRA-akun nimitys on syntynyt kehitystyön tiedemiesryhmän mukaisesti. Yhteistyöprojektissa on ollut mukana tiedemiehiä sekä Iso-Britanniasta, että Etelä-Afrikasta (Zeolites applied to Battery Research Africa). Akun kehitystyön pohjana on ollut Natrium-rikkiakku ja akkutyyppi onkin Natrium-rikkiakun johdannainen. NaS-akusta poiketen positiivisena elektrodina toimii nikkelikloridi rikin tilalla. Natrium-rikkiakuissa käytetään positiivisena elektrodina myös nikkelikloridin ja rautakloridin seosta.

2.5 Superkondensaattorit

Joissakin tapauksissa superkondensaattoreita on myös rinnastettu sähkökemiallisiin akkuihin, koska superkondensaattoreiden toimintaperiaate on samantapainen. Superkondensaattoreissa energia varastoidaan samalla tavalla kuin sähkökemiallisessa akussa ja molemmissa syntyy sähkökenttä kahden elektrodin välille. Superkondensaattorissa syntyy kuitenkin sähkökemiallisesta akusta poiketen kaksi vastakkaissuuntaista sähkökenttää. Toiminta perustuu elektrodien välissä olevaan erotinkalvoon, joka päästää ioneja läpi. Superkondensaattoreissa elektrodit ovat kauttaaltaan päällystettyjä ohuita kerroksia ja elektrodit on yhdistetty johtavaan metalliseen virranottimeen ja elektrodien pinta-ala on maksimoitu huokoisella elektrodimateriaalilla. Huokoisella pinta-alaltaan maksimoidulla elektrodimateriaalilla saavutetaan suuri energiatiheys.

Tavalliseen kondensaattoriin verrattuna superkondensaattoriin voidaan varastoida suuri määrä sähköenergiaa. Superkondensaattorit mahdollistavat rakenteensa ja ominaisuuksiensa perusteella nopean latautumisen ja purkautumisen ja tästä syystä superkondensaattoreita käytetään erityisesti sovelluksissa, joissa on tarvetta nopealle purkautumiselle ja latautumiselle. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi junat, joissa on sähköenergian avulla tarvetta kiihdyttää nopeasti runsaasti sähköenergiaa hyödyksi käyttäen ja vastaavasti jarrutuksissa voidaan superkondensaattoreihin varastoida jarrutuksessa syntyvää sähköenergiaa. Vastaavalla tavalla superkondensaattoreita voidaan hyödyntää myös sähköautoissa jarrutusten energian talteenotossa ja kiihdytyksissä. Kuvassa 10 oleva Eatonin XLR malli on yksi saatavilla olevista superkondensaattoreista.



Kuva 10. Eatonin XLR 48V superkondensaattori (Eaton 2016).

Superkondensaattoreita ei tällä hetkellä yleisesti käytetä uusiutuvan sähköenergian varastoinnissa tai muissa sähköenergiavarastoissa, koska uusiutuvan energian varastoinnin yhteydessä ei yleensä ole tarvetta erityisen nopealle latautumiselle ja purkautumiselle. Tyypilliset tarpeet superkondensaattoreille ovat nopeiden syklien käyttökohteissa, kuten esimerkiksi junien jarrutuksessa syntyvän energian talteenotossa.

2.6 Akkuteknologian tulevaisuuden kehityssuunta

Akkuteknologioiden kehityksessä on selkeästi tunnistettavissa kolme osaluettua, jotka muodostavat haasteen ja ovat hidastaneet akkuteknologian kehitystä, toisaalta ratkaisun mahdollinen löytyminen ja siihen uskomisen ovat antaneet mahdollisuuden uusien teknologioiden kehittymiselle. Fyysisen koon pientyminen, varauskapasiteetin kasvaminen suhteessa kokoon ja kustannustehokkuus ovat olleet kolme pääkehityskohdetta akkuteknologiassa. Tutkimus- ja kehitystyötä tehdään maailman laajuisesti sekä teollisuudessa että valtiollisella tasolla.

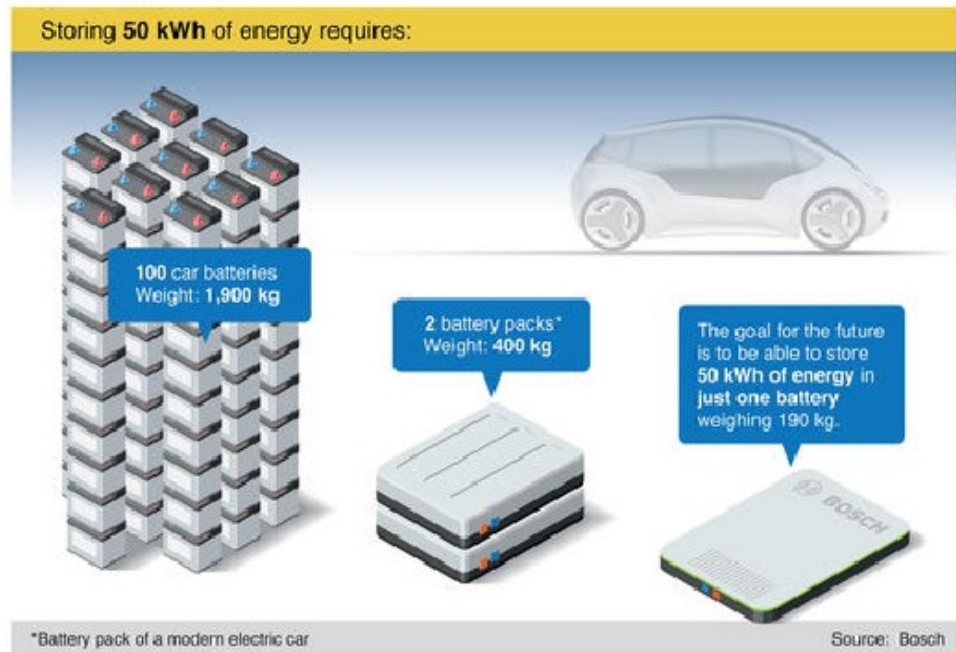
Yleisellä tasolla raportoivat uudet akkuteknologiat rinnastetaan hyvin usein sähköajoneuvojen tai mobiililaitteiden akkuteknologioiksi, mutta luonnollisesti uusia innovaatioita voidaan hyödyntää muissakin käyttötarkoituksissa. Useassa kehitysprojektissa nähdään sähköautojen ja uusiutuvan energian tulevaisuuden tarpeet samankaltaisina, vaikka kehitysprojektien ulospäin näkyvä pääpaino markkinoiden vuoksi saattaa ollakin sähköajoneuvojen akuissa. Erilaisia uusia akkuteknologioita raportoidaan tasaisin väliajoin, mutta edelleen varsinainen suuri läpimurto markkinoilta puuttuu. Akkuteknologioiden kehityksessä on selkeästi kaksi linjaa, pienemmän kapasiteetin ja fyysisen koon akkuja mobiililaitteisiin ja suuremman koon ja

varauskyvyn akkuja suurempiin järjestelmiin kuten uusiutuvan energian varastointiin ja sähköautojen energianlähteeksi. Kuitenkin akun koosta riippumatta turvallisuuteen ja energiatiheuteen liittyvien ominaisuuksien tutkitaan panostetaan merkittävästi.

Harvardin Yliopistossa tehtyjen tutkimusten perusteella on saatu lupaavia testituloksia sähkökatalyysistä ilman jalometalleja. Harvardin tutkimuksissa kyseessä on ollut metalleista vapaa virtausakku, joka perustuu runsaiden luonnonantimien sähkökemian eli edullisiin ja pieniin orgaanisiin kiinoneihin eli hiilipohjaisiin molekyyliin. Ne ovat samoja molekyyliä, jotka varastoivat energiaa kasveissa ja eläimissä. (Nanobittejä verkkojulkaisu 2014)

Shenzen Institutes of Advanced Technology (SIAT) kertoi keväällä 2016 onnistuneensa kehittämään teknologian jota voidaan pitää pitkänä edistysaskeleena akkuteknologiassa kannettavan elektroniikan ja jopa sähköautojen yleistymiselle. Tässä tapauksessa kyseessä on alumiini-grafiitti-duaalioniakku (AGDIB). Elektrodimateriaalina on käytetty alumiinia ja grafiittia. Tässä sovelluksessa elektrolyyttinä on käytetty litiumsuolaa ja karbonaattiliuosta. Kyseisellä teknologialla saavutetaan selvästi kevyempi ja halvempi akku verrattuna litiumioniakkuihin samalla energiatihedyyden ollessa suurempi. AGDIB akun energiatihedyydeksi mainitaan 560 Wh/l. Kustannuksiltaan akun valmistus maksaa puolet vähemmän kuin litiumioniakku. Kierrätettävyys on myös tärkeässä roolissa ja hävittäminen käyttöään loppuessa on huomattavasti helpompaa verrattuna litiumioniakkuihin. (Shenzen Institute of Advanced Technology 2016)

Bosch kehittää Saksassa uudella Renningenin tutkimuskampuksellaan akkuteknologiaa, jossa kuvassa 11 näkyvän tuotekehitysprojektin tavoitteena on tuottaa markkinoille vuoteen 2020 mennessä akku, jonka paino on 190 kg, latausaika 15 minuuttia (75%) ja energiasisältö 50 kWh. Boschin näkemyksen mukaan keskikokoisella sähköautolla tulisi olla käytettävissä energiaa 50 kWh, jotta toimintamatkat ovat riittävän pitkiä sähköautojen yleistymiseksi. Nykyisellä lyijyakkuteknologialla 50 kWh energian varastointiin tarvitaan 100 kpl lyijyakkuja joiden kokonaispaino olisi 1900 kg. (Bosch 2016)



Kuva 11. Boschin näkemys akkuteknologian kehityssuunnasta (Bosch 2016).

Tällä hetkellä tuotannossa olevien sähköautojen akkujen paino on noin 230 kg ja energiaa kyseisiin akkuihin voidaan varastoida 18-30 kWh mallista riippuen. Bosch investoi noin 400 miljoonaa euroa vuosittain sähköautoilun kehittämiseen ja Boschin ennusteiden mukaan 10 vuoden kuluttua noin 15% uusista ajoneuvoista on varustettu sähkömoottorilla. Vaikka Bosch on raportoinut kehittävänsä akkuteknologiaa sähköautojen tarpeet edellä, heijastuu kehitystyö luonnollisesti myös muihin akkuja käyttäviin tuotteisiin.

Sähköautojen akkujen teknologian kehitys tukee myös sähköverkkojen yhteydessä käytettävien akkupohjaisten sähkövarastojen kehitystä. Sähköautojen yleistyessä voidaan myös teoreettisesti ajatella, että jokainen sähköauto on samalla myös potentiaalinen pieni liikkuva sähkövarasto, joka kytetään sähköverkkoon ja irtikytketään sähköverkosta aina ajamaan lähdetäessä. Esimerkiksi sähköautoja täynnä olevat parkkipaikat työpaikoilla, tai missä vain, muodostavat näin ollen erittäin suuren potentiaalisen sähkövaraston jota tulevaisuudessa suurella todennäköisyydellä tullaan myös hyödyntämään.

Oleellista akkuteknologian kehityksessä ja sen seurannassa on huomata, että innovatiivisia artikkeleita uusista tekniikoista ilmestyy luettavaksi tiheään tahtiin. Tämä kuvaa markkinoiden tarvetta löytyä läpimurto akkuteknologialle kysynnän ja tarpeiden koko ajan kasvaessa. Näiden artikkeleiden todenperäisyyden arviointi on haastavaa, koska useat näistä perustuvat pelkkään teoriaan tai prototyyppiin laboratorio-olosuhteissa. Varmaa kuitenkin on, että jonakin päivänä läpimurto tulee akkuteknologiassa ja se tulee omalta osaltaan mullistamaan myös sähkövarastointia.

3 ÄLYKÄS SÄHKÖVERKKO

Suomen sähköverkko koostuu kantaverkosta ja jakeluverkosta. Kanta- verkko muodostaa valtakunnallisen suurjännitteisen pitkien matkojen sähköverkon ja jakeluverkko puolestaan koostuu keski- ja pienjänniteverkoista, joilla sähköverkko jaetaan kuluttajille. Automaation kehityksen ja sähköverkojen muuttuneiden tarpeiden seurauksena on syntynyt markkinointilähtöinen käsite älykäs sähköverkko, vaikka tieteellisesti tarkasteltuna järjestelmä ei välttämättä vielä pystykään varsinaiseen itsenäiseen päätöksentekoon tai oppimaan uusia asioita, kuten älykkäiltä järjestelmiltä tyypillisesti edellytetään. Tässä opinnäytetyössä, kuten yleisestikin, käsitteellä älykäs sähköverkko tarkoitetaan sähkönsiirtoverkon, sähkötuotannon, sähkövarastoinnin ja näihin liittyvän automaatio-ohjauksen muodostamaa kokonaisuutta. Älykkään sähköverkon toiminnot perustuvat tuotannon ja kulutuksen ohjauksen tasapainotteluun asetettujen parametrien puitteissa.

Älykkään sähköverkon yksi ratkaisumalli on nähtävillä kuvassa 12, jossa yhdistetään sähkövoimatekniikkaa, automaatiotekniikkaa ja tietotekniikkaa muodostaen sähköteknisesti kohtuullisen monimutkaisen kokonaisuuden ja samalla mahdollistaen esimerkiksi uusiutuvan energian tuotannon huomiointin sekä varastoinnin osana energiatehokasta sähköverkkoa. Kysynnän ja tuotannon optimoituun ohjaukseen tarvitaan itse sähköverkon lisäksi sähkömittarit etälukuominaisuudella, kattava sähköyhtiön ICT-järjestelmä ja runsaasti erilaista mittaus- ja ohjausteknologiaa riippuen verkon koosta ja käytöstä. Älykäs sähköverkko tyypillisesti räätälöidään juuri kyseiseen tarpeeseen ja tällä tavoin päästään paremmin tavoitteisiin hyödyntäen juuri kyseisen kohteen vahvuuksia esimerkiksi uusiutuvan energian tuotannossa. Älykäs sähköverkko voi olla pien-, keski- tai suurjänniteverkko tai verkon osa. Teknisesti suuret jännitteet voivat muodostaa rakenteellisia rajoitteita, joiden kustannustehokas rakentaminen ei ole mahdollista tai muutoin järkevää.

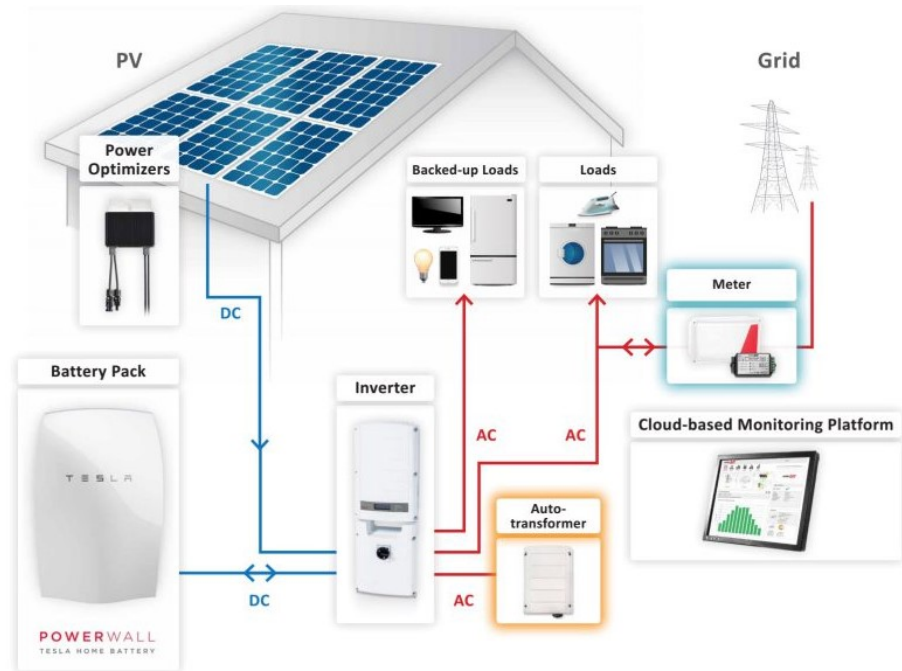


Kuva 12. Älykäs sähköverkko (3M 2017).

Niin kutsutussa tavallisesti sähköverkossa sähkövirta kulkee sähköntuotantolaitoksesta loppukäyttäjälle eli vain yhteen suuntaan sähköverkon poikkeustilanteita lukuun ottamatta. Yksisuuntaiset verkot ovat olleet rakenteeltaan yksinkertaisia rakentaa ja ylläpitää, mutta tarpeiden muuttuessa yksisuuntaiset verkot ovat jäämässä vanhanaikaisiksi. Tällaiset perinteiset yksisuuntaiset verkot ovat rakenteensa vuoksi huonosti sopeutuvia hajautetun sähköntuotannon lisääntymiseen. Älykäs sähköverkko pyrkii kokoa ajan optimoimaan tuotantoa, kulutusta ja varastointia ja ennakoimaan tulevia tarpeita esimerkiksi käyttöhistorian tai tulevien sääennusteiden ja vuodenajan perusteella.

Älykäs sähköverkko voi olla pienemmässä mittakaavassa myös kiinteistön sisäinen sähköverkko, joka sisältää sähköntuotantoa, kulutusta ja kiinteistön sisäisen älykkään ohjauksen. Tällaisessa kiinteistön sisäisessä älykkäässä sähköverkossa tyypillisesti sähköntuotanto on toteutettu uusiutuvalla energialla kuten esimerkiksi tuuligeneraattorilla tai aurinkosähköpaneelilla. Uusiutuvan energian varastointi on myös tärkeässä roolissa kiinteistön sisäisissä verkoissa. Varastointiin käytetään tyypillisesti pientaloissa sähkökemiallisia akkuja, esimerkiksi litium-ioni pohjaista akkua tai vastaavasti perinteisempiä uusiutuvan energian varastointiin soveltuvia AGM-, geeli-, tai vapaahappoakkuja riippuen akkujen sijoituksesta ja kapasiteettitarpeesta. Pientalon älykkäässä sähköverkossa akusto tyypillisesti pystyy sähkökatkon sattua syöttämään riittävästi energiaa esimerkiksi jääkaapille ja kriittiselle valaistukselle.

Pieni kiinteistö voi siis yksinäänkin muodostaa älykkään sähköverkon, jota havainnollistetaan kuvassa 13. Vastaavasti älykäs sähköverkko voi olla suuri teollisuusalue tai jopa kokonainen kaupunki. Tyypillistä älykkäälle sähköverkolle on saarekemäinen toiminta eli se toimii omana saarekkeenaan ja pyrkii toimimaan riippumattomana kantaverkosta. Sähkövirta voi kulkea joko älykkään sähköverkon suuntaan tai vastaavasti tietyissä tilanteissa älykäs sähköverkko voi syöttää sähkövirtaa myös kantaverkon suuntaan. Sähköverkolla on yleensä liittymäraja pinta kantaverkkoon ja liittymäraja pinnassa on tyypillisesti kaksisuuntainen mittaus, jolla voidaan todentaa myös kantaverkkoon syötetyn sähköenergian määrä.



Kuva 13. Pientalon varastoiva älykäs sähköverkko (Electrek 2016).

3.1 Älykkään sähköverkon toimintaperiaate

Mittaukset ja niihin perustuva ohjaus ovat tärkeässä asemassa älykkäässä sähköverkossa. Muuttuneisiin sähköverkon tilanteisiin pitää reagoida nopeasti. Liityntärajapintana etäluettavaa mittaria tarkastellessa voidaan jo nykypäivänä todetta mittalaitteet monipuolisiksi. Nykypäivän etäluettavilla mittalaitteilla voitaisiin jo mittauksen lisäksi etäyhteydellä tarkkailla ja analysoida sähkön laatua sekä toteuttaa erilaisia komentoja kuten esimerkiksi verkon irti- ja takaisinkytkentöjä. Älykkäässä sähköverkossa on useita mittauspisteitä, joihin perustuen sähköverkkoa ohjataan energiatehokkuuden optimoimiseksi.

Muutoksiin reagointi ja muutosten ennakointi tekevät älykkäästä sähköverkosta tavallista yksisuuntaista verkko energiatehokkaamman. Sääennusteisiin ja aiempaan käyttöhistoriaan perustuen voidaan tehdä laskelmia ja oletamia, joilla ohjataan verkon toimintaa. Mikäli seuraavaksi päiväksi on luvattu aurinkoista säätä, voidaan sääennusteen perusteella olettaa, että tänään sähkövarastosta käytettävän energian tilalle saadaan seuraavana päivänä ladattua vastaava määrä energiaa aurinkosähköpaneeleista ja näin ollen voidaan energiaa käyttää huoletta sähkövarastosta. Vastaavia ennusteisiin perustuvia laskelmia ja oletamuksia voidaan tehdä myös tuuligeneraattoriin ja tuuliennusteisiin perustuen. Käyttöhistoriaan perustuen voidaan tyypillisesti olettaa, että kulutukset teollisuusalueella eivät ole samalla tasolla viikonloppuisin ja arkisin. Teollisuusalueilla voidaan käyttöhistorian ja sääennusteiden perusteella ennakoida, että sähköverkon kuormitushuiput ovat aikavälillä klo 08.00 – 17.00 ja näin ollen voidaan sähkövarastosta luovuttaa sähköenergiaa työpäivän aikana ja ladata sähkövarastoa kantaverkosta vain pakollinen tarvittava sähköenergian varmuusmäärä päivän aikana ja varsi-

nainen sähkövaraston täyteen lataus voidaan tehdä yön aikana alhaisemalla energian hinnalla. Perjantain jälkeisenä yönä ei välttämättä tarvitse täyteen latausta tehdä, jos ennusteiden perusteella täyteen lataus voidaan tehdä viikonlopun aikana uusiutuvalla energialla. Tällaisessa käytössä älykäs sähköverkko on parhaimmillaan ja mahdollistaa kustannussäästöt sekä ekologisemman toiminnan.

3.2 Älykkään sähköverkon sovellukset ja mahdollisuudet

Älykkään sähköverkon toimintaa pidetään luotettavampana kuin perinteistä sähköverkkoa mukautuvuuden, ennakoinnin ja poikkeustilanteita korjaavan automaation vuoksi. Poikkeustilanteissa verkko pyrkii itse korjaamaan vikatilannetta optimoimalla tuotannon ja kulutuksen tasapainoa ennalta määrittäen parametrien mukaisesti. Älykkään sähköverkon katkeamaton toiminta on mahdollista, vaikka verkon ulkopuolelta tuleva sähkönsyöttö katkeaisikin. Yksi älykkään sähköverkon mahdollisuuksista onkin juuri oma-varainen toiminta sähköverkon ennalta määritellyissä poikkeustilanteissa. Esimerkiksi laajan ja pitkäkestoisen sähkökatkon ilmetessä älykäs sähköverkko huomaa välittömästi kantaverkon sähkökatkon ja ryhtyy optimoimaan tuotantoa ja kulutusta.

Etävalvonta, raportointi ja optimointi ovat myös uusia ominaisuuksia, joita ei reaaliaikaisesti perinteisen yksisuuntaisen sähköverkon osalta ole ollut käytettävissä.

Älykkäissä sähköverkoissa voidaan toiminta määritellä juuri kuhunkin käyttöön sopivaksi ja optimoida toiminnot juuri siihen tilanteeseen sopivaksi. Tämä mahdollistaa myynnin ja tuotekehityksen näkökulmasta lähes rajattomat vaihtoehdot. Erilaisia sovelluksia voidaan kehittää useaan eri käyttöön ja sovelluksia voidaan yhdistellä ristiin. Ympäristötietoisuus on noussut tärkeäksi markkinointivaltiksi älykkäiden sähköverkkojen myyntiin ja juuri tähän perustuen markkinointia on suunnattu. Ekologisuuden ja joustavuuden avulla voidaan markkinointia kohdistaa useaan kohteeseen, vaikka älykkään sähköverkon kertaluontoiset rakennuskustannukset ovat perinteistä yksisuuntaista sähköverkkoa korkeammat.

Kiinteistöjen sisäisissä sähköverkoissa voidaan määritellä poikkeustilanteissa esimerkiksi osa kuormista kytkettäväksi pakko-ohjauksella pois päältä poikkeustilanteen ajaksi. Ilmastointi, osa valaistuksesta, osa lämmityksestä tai muut vastaavat toiminnot voidaan määritellä automaattisesti poikkeavasti toimiviksi kantaverkon vikatilanteessa ja näin ollen älykkään saarekemaisen sähköverkon omavarainen toiminta-aika pitenee merkittävästi kriittisten toimintojen katkeamatta. Tällainen tarve saattaa olla esimerkiksi teollisuudessa, maataloilla, terveydenhuollossa tai muissa sähkökriittisissä toiminnoissa.

Nykypäivänä pidetään mahdollisena omaa erillistä kokonaan kantaverkosta erotettua saarekemaista älykästä sähköverkkoa. Jos kyseessä on teollisuusalue, voidaan teollisuusalueen markkinoinnissa yrityksille jo käyttää hyödyksi omaa sähköverkkoa. Teollisuusalueen myynnissä voidaan korostaa esimerkiksi energiaomavaraisuutta ja ekologisuutta. Teollisuusalueen

omalla älykkäällä sähköverkolla voidaan myös varmistaa katkeamaton sähkönsyöttö, vaikka kantaverkossa olisikin poikkeustilanne. Jos sähkövarasto on osana sähköverkkoa, ei teollisuusalueen yritysten tarvitse rakentaa omia varavoimajärjestelmiä, joka osaltaan myös pienentää rakennuskustannuksia. Järkevästi rakennetulla energiatehokkaalla teollisuusalueella voidaan keskitetysti toteuttaa varavoima sijoittamalla alueelle yhteinen sähkövarasto, josta poikkeustilanteessa syötetään sähköenergiaa teollisuusalueen sähköverkkoon. Lisäksi teollisuusalueen rakennusmääräyksillä voidaan määrätä, että teollisuusalueen rakennusten katoilla tullaan sijoittamaan aurinkosähköpaneeleita, joilla tuotetaan alueen sähköverkkoon energiaa. Tällä tavoin toimittaessa ei tarvita teollisuusalueelta suuria maapinta-aloja aurinkosähköpaneelien sijoitukseen. Kiinteistöjen katoille sijoittamisella voidaan sähköenergiavaraston ollessa täynnä ohjata aurinkosähköenergia kiinteistön käyttöön. Tällaisen järjestelmän tehokas ohjaus vaatii kaksisuuntaisen invertterin kiinteistöön ja ulkoisen ohjauksen.

Ratkaisuja verkon toteuttamiseksi voi olla paljon erilaisia ja mahdollisuuksia toteutukseen on monia erilaisia. Voidaankin todeta, että älykäs sähköverkko on kehittymässä koko ajan ja muuntautuu tarpeiden mukaan. Erityisesti ekologisuuden ja omavaraisuuden parantamisen näkökulmasta älykäs sähköverkko antaa paljon erilaisia mahdollisuuksia toteutukseen. Ei ole välttämättä paras ratkaisu kopioida älykkään sähköverkon rakenne ja mitoitus sellaisenaan jostakin muusta kohteesta, koska jokainen kulutuskohde on hieman erilainen joka tapauksessa.

3.3 Teollisuus 4.0 osana älykästä sähköverkkoa

Teollisuus 4.0 tarkoittaa teknologiaa, jolla teollisen tuotannon kustannustehokkuutta ja teollisuuden kilpailukykyä voidaan parantaa. Tuotantolaitoksissa tämä tarkoittaa koneiden ja laitteiden parantunutta reaaliaikaista tiedonsiirtoa. Teollisuus 4.0 ajatusmallissa osavalmistus, tuotanto ja logistiikkaketju keskustelevat keskenään reaaliaikaisesti. Tuotantoprosessit pystyvät myös optimoimaan itseään ja tuotantoprosessin aikana valmistettavat tuotteet kommunikoivat keskenään. Teollisuus 4.0 tukeutuu reaaliaikaiseen mittaukseen ja tätä voidaan jo nyt käyttää energiankulutuksen vähentämiseen tai esimerkiksi järjestelmän vikaantumisen varoittamiseen. Siemens vertaa kuvainnollisesti teollisuus 4.0: a tietokoneshakkiin, jossa tietokone laskee optimaalisen siirron kaikkiin mahdollisiin tilanteisiin. Siirtojen jälkeen tietokone tekee analyysin ja valitsee parhaan mahdollisen siirron kyseiseen pelitilanteeseen. (Siemens 2016)

Samalla teoreettisella ajatusmallilla voidaan ajatella älykkään sähköverkon toimivan tulevaisuudessa. Sähköverkon instrumentointi, sähköntuotanto ja kulutus keskustelevat keskenään ja näin ollen reaaliaikainen optimointi on käynnissä koko ajan. Voidaankin siis ajatella, että älykäs sähköverkko on yksi sovellus teollisuus 4.0 ajatusmallista, jossa laitteet ja koneet keskustelevat keskenään ja jatkuva optimointi on käynnissä koko ajan.

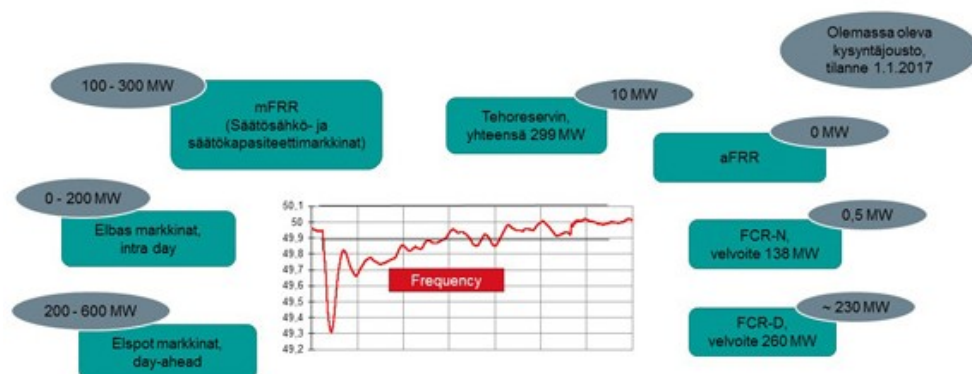
4 KYSYNTÄJOUSTO

Kysyntäjoustopilla yleisesti tarkoitetaan kahta eri asiaa; sähkökäytön siirtämistä korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan tai käytön hetkellistä muuttamista tehotasapainon hallinnan tarpeisiin. Kysyntäjoustopille on tullut tarvetta energian tuotantotapojen ja kapasiteettien muuttuessa. Kysyntäjoustopin tarve esiintyy, kun joustamattoman sähköntuotannon, esim. ydinvoiman tai uusiutuvan energian, määrä verkossa lisääntyy. Tällainen hankalasti joustava tuotanto asettaa suuria haasteita nykyiselle sähkömarkkinamallille, jossa vain energialla käydään kauppaa (c/kWh). Kysyntäjoustopia lisäämällä ja markkinoita kehittämällä pyritään turvaamaan nykyisen markkinamallin säilyminen tulevaisuudessa.

Suomessa kysyntäjoustop on ollut tunnettua jo pitkään suurteollisuudessa. Paljon sähköä kuluttavan ja joustopin mahdollistavan teollisuuden kuormat ovat toimineet tehotasapainon ylläpidossa käytettävänä reserveinä jo pitkään. Yleisimmin kysyntäjoustopia on käytetty metsä-, metalli- ja kemianteollisuuden kuormissa. Kysyntäjoustop on erittäin luonteva mahdollisuus lisätä tarjontaa niin säätösähkö- kuin reservimarkkinoillakin. Kuvassa 14 on nähtävillä Suomen markkinoilla olevan kysyntäjoustopin määrä.

Sähkömarkkinoille ovat tulleet myös ns. aggregaattorit eli yritykset, jotka muodostavat pienkulutuksesta ja -tuotannosta isomman kokonaisuuden, joka voi osallistua eri kysyntäjoustopmarkkinoille. Kuluttajataso pientuotanto voidaan myös rinnastaa kysyntäjoustopiin, mikäli se reagoi markkinatilanteeseen ja sillä pienennetään kohteen sähkönto verkosta, esimerkiksi rakennusten varavoimakoneet.

Kysyntäjoustopiin osallistuminen voi edellyttää yrityksiltä alussa investointeja kuten ohjausjärjestelmät yms. Pitkällä aikavälillä se voi tarjota kuitenkin kustannustehokkaan ratkaisun niin yritykselle kuin kansantaloudellekin.



Kuva 14. Markkinoilla olevan kysyntäjoustopin määrä Suomessa (Finggrid 2017).

4.1 Kysyntäjouaston toimintaperiaate

Pientuotanto voidaan rinnastaa kysyntäjoustoan, mikäli se reagoi markkinatilanteeseen ja ulkoiseen ohjaukseen perustuen pienentää sähkötehon kulutusta. Yksinkertaisimmillaan kysyntäjousto voi olla pientalon sähkönkulutuskuormien poiskytkemistä tietyksi ajaksi ulkoiseen ohjaukseen perustuen. Ulkoinen ohjaus voi tulla sähköyhtiöltä tai joltakin muulta operaattorilta. Esimerkiksi sopimuksen mukaan voidaan pientalossa kytkeä lämminvesivaraajan vastukset pois käytöstä erikseen määritellyksi ajaksi. Tällä tavoin pienennetään tehonkulutusta tietyinä kuormitushuippuna tai ulkoiseen ohjaukseen perustuen. Nykytekniikan mahdollistamana tämä on teknisesti toteutettavissa kohtuullisilla kustannuksilla erityisesti uudisrakentamisessa.

Vaikka pienkiinteistöissä olisi omaa sähköntuotantoa, se harvoin toimii suoraan kysyntäjoustopaikoilla. Aggregaattorit muodostavat pientuotannoista ja pienkulutuksista suurempia kokonaisuuksia ja näin ollen Aggregaattorit pystyvät vaikuttamaan paremmin sähkömarkkinoihin. Fingridin säätösähkömarkkinoille ei voi osallistua alle 10 MW teholla ja tästä syystä aggregaattoreille on olemassa kysyntää.

Suuremmissa mittakaavassa teollisuudessa voidaan ulkoiseen ohjaukseen eli kysyntäjoustopyyntöön reagoida nopeasti prosessin sallimissa rajoissa. Tyypillisiä tällaisia helposti poiskytkettäviä tai vähintään säädettäviä kuormia, kuten esimerkiksi kiinteistöjen ilmastointeja, voidaan ohjata pienemälle teholle ulkoisen kysyntäjoustopyyntöön mukaisesti. Joissakin tapauksissa voidaan suurten varastojen valaistusta vähentää ulkoisten ohjausten mukaisesti. Suurempia kuormia on myös prosessiteollisuudessa ja siihen liittyvissä tehonsäädöissä. Tässä ajatusmallissa on oleellista, että ohjauksen piirissä on riittävästi kiinteistöjä ja toimintoja, jotta järjestelmästä saadaan vastaavaa hyötyä. Usein teollisuuslaitos yksistään on jo merkittävä kuorma sähkömarkkinoiden näkökulmasta.

4.2 Markkinapaikat ja ansaintamallit

Kysyntäjoustopaikoilla on olemassa tällä hetkellä kahdeksan erilaista markkinapaikkaa. Osallistuminen esimerkiksi reserveihin voi tarkoittaa vain muutama sekunnin mittaista sähköverkosta otettavan tehon hetkellistä vähennystä tai vaihtoehtoisesti esimerkiksi tunnin katkoa kerran kymmenessä vuodessa. Voi olla myös mahdollista, että sähköverkon katkoa ei tule ollenkaan, mikäli tehoa pystytään säätämään joustavasti.

Eri markkinapaikkojen korvaustasot, tekniset vaatimukset ja muut ominaisuudet vaihtelevat. Taulukossa 6 on kuvattu markkinapaikkojen viitteelliset korvaustasot ja teknisten vaatimusten pääkohdat.

Taulukko 7. Kysyntäjoustop markkinapaikat Suomessa (Finngrid 2016).

Tuote	Lyhenne	Sopimustyyppi	Minimi-tarjouskoko	Aktivoituminen	Aktivoituu	Korvaustaso 2016*
Taajuusohjattu käyttöreservi	FCR-N	Vuosi- ja tuntimarkkinat	0,1 MW	Lineaarisesti välillä 50,1 - 49,9 Hz, 0,1 Hz muutos 100 % 3 min	Jatkuvasti	17,42 €/MW,h (vuosi-markkinat) + energiahinta nettoenergiasta
Taajuusohjattu häiriöreservi	FCR-D	Vuosi- ja tuntimarkkinat	1 MW	Voimallaitokset: lineaarisesti välillä 49,9 - 49,5 Hz, kun f alle 49,5 Hz 50 % 5 s ja 100 % 30 s Relekytketyt kuormat: vaihtoehtoisesti 49,7 Hz 5s TAI 49,6 Hz 3s TAI 49,5 Hz 1 s	Useita kertoja vuorokaudessa Muutaman kerran vuodessa	4,5 €/MW,h (vuosi-markkinat)
Automaattinen taajuudenhallinta-reservi	FRR-A	Tuntimarkkinat	5 MW	FG:n lähettämän tehonpyyntisignaalin mukaisesti, 100 % 2 min	Useita kertoja vuorokaudessa	Kapasiteettikorv aus pay as bid periaatteella + energiahinta
Säätösähkömarkkinat	FRR-M	Tuntimarkkinat	10 MW	FG aktivoi tarjouksia hintajärjestyksessä, 100 % 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti	Markkinahinta
Elspot **)		Tuntimarkkinat	0,1 MW	12 h	-	Markkinahinta
Elbas **)		Tuntimarkkinat	0,1 MW	1 h	-	Markkinahinta
Tehoreservi ***)		Pitkäaikainen	10 MW	15 min	Harvoin	EV:n hankintakilpailun mukaisesti

*) Korvaustason hinnat ovat viitteellisiä, tarkemmat ehdot ja hinnoitteluperiaatteet löytyvät kuhunkin markkinapaikkaan liittyvistä sopimuksista.
 **) Nord Pool
 ***) Energiavirasto

Sähkökauppaa käydään eri aikoina ennen sähkön toimitusta tai ylös- / alasäätöä. Kysyntäjousto voidaan toteuttaa kaikilla markkinoilla. Kysyntäjoustop markkinoille osallistutaan tarjousperusteisesti jättämällä tarjous joko Nord Poolin Spotissa tai Finngridin säätösäätömarkkinoille. Nord Pool ja Finngrid hyväksyvät tarjoukset hintaperusteisesti. Osallistuminen sähkömarkkinoilla edellyttää sopimuksia Nord Poolin, Finngridin tai aggregaattorin kanssa. Sähkömarkkinoita havainnollistetaan kuvassa 15.

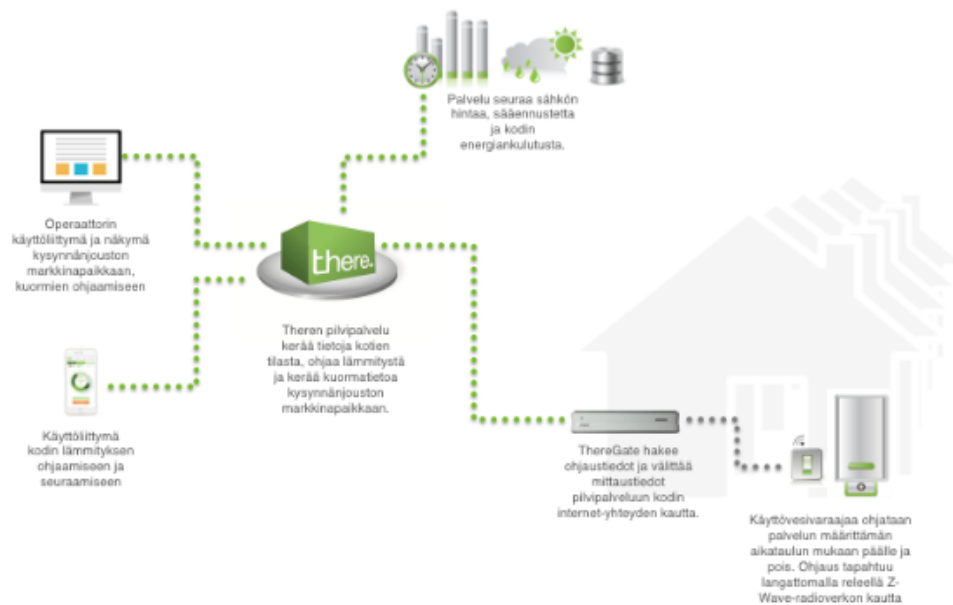


Kuva 15. Nord Pool Spot ja Finngrid sähkömarkkinat (Elfi 2017).

4.3 Käytännön sovellukset

Kysyntäjoustoan liittyviä selvityksiä ja projekteja on käynnissä paljon eri puolilla Suomea erityisesti käytön siirtämisestä toiseen ajankohtaan. Ras- kaan teollisuuden lisäksi tutkimuksissa on tunnistettu pientalot myös suu- reksi kysyntäjoustopotentiaaliksi tulevaisuuden markkinoilla. Suomessa on noin 500 000 sähkölämmitteistä pientaloa ja noin 250 000 öljy- tai kaasu- lämmitteistä taloa. Pientaloissa voidaan hyödyntää suoraa sähkölämmi- tystä, varaavaa vesikiertoista sähkölämmitystä ja käyttövesivaraajaa joustoa toteutettaessa. Nämä yhdessä muodostavat suuren potentiaalisen kysyntäjous- tomarkkinoille ja näiden sähkönkäyttö on pääsääntöisesti siirrettävissä muutamilla tunneilla toiseen ajankohtaan.

Fingrid ja There Corporation ovat yhteistyössä toteuttaneet tutkimus- ja tuo- tekehitysprojektin, jota havainnollistetaan kuvassa 16. Projektissa tutkittiin Theren kehittämän kodinenergihallintajärjestelmän soveltuvuutta kysyntä- joustomarkkinoille. Kotitalouksissa ohjaus voidaan toteuttaa ainakin kol- mella eri tavalla, hyödyntämällä etälueuttavan AMR- mittarin kuormanoh- jausrelettä, erillisellä kodin energianhallintajärjestelmällä tai perinteisem- mällä kiinteistöautomaatiolla. (There Corporation, 2017)



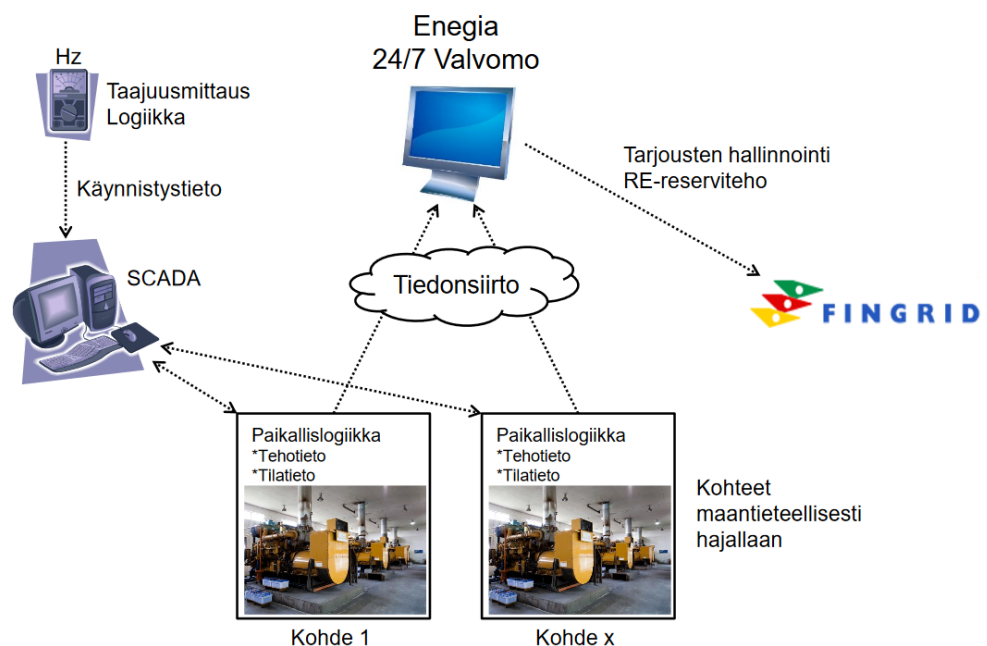
Kuva 16. There Corporationin kodin energiahallintajärjestelmä yksinkertaistettuna (There Corporation 2017).

Tällainen kodin energianhallintajärjestelmä mahdollistaa huomaamattoman kysyntäjousto mahdollisuuden tarjoamisen aggregaattoreille. Esimerkiksi käyttövesivaraajan varauksen sähkönsyöttö voidaan siirtää muutamalla tun- nilla ilman käytännön vaikutusta pientalon päivittäiseen elämään. Kysyntä- joustoa ja kodin lämmitystä ohjataan tässä toteutusmallissa Theren pilvipal- velun kautta. Tietokantaohjatussa sovelluksessa hallinnoidaan siihen kyt- kettyjä pientaloja. Pientaloissa voidaan pilvipalvelun kautta seurata oman kodin lämmitystä henkilökohtaisen käyttöliittymän avulla. Kotiin asennet- tavaa ohjausyksikköä voidaan ohjata pilvipalvelun kautta, joko pientalon

asukkaan tai aggregaattorin toimesta. Ohjausyksikkö ohjaa langattomasti pientalon lämmitystä ja kerää samalla tietoja lämpömittareilta sekä ohjauslaitteilta. Lämmityksen ohjausta varten haetaan pilvipalveluun myös tietoja säästä ja sähkö hinnasta, joita hyödynnetään pientalon sähkönkäytön ohjauksessa.

Varavoimakoneet muodostavat merkittävän kokonaisuuden taajuusohjattuun häiriöreserviin sekä säätösähkömarkkinoille. Varavoimakoneiden käynnistysajat vaihtelevat laitteiston rakenteesta ja ohjauksesta riippuen. Säätösähkömarkkinoille riittää hitaamminkin käynnistyvä varavoimakone, mutta taajuusohjattuun häiriöreserviin käynnistymisaika tulee olla lyhyempi. Taajuusohjattua häiriöreserviä varavoimakoneilla havainnollistetaan kuvassa 17.

Maantieteellisesti hajautettujen varavoimakoneiden käynnistykseen ja ohjaukseen voidaan käyttää apuna SCADA-järjestelmää (Supervisory Control And Data Acquisition), jossa keskitetysti valvomosta ohjataan varavoimakoneiden automaatiojärjestelmiä. Varavoimakoneet voidaan ohjelmoida käynnistymään taajuusohjattuun häiriöreserviin taajuuden ollessa esimerkiksi 49,70 Hz ja vastaavasti varavoimakoneet voidaan ohjelmoida sammumaan taajuuden pysyessä yli 5 minuuttia 49,90 Hz tasolla. Tässä mallissa taajuusmittauksen perusteella SCADA-järjestelmä käynnistää ja sammuttaa varavoimakoneet sähköntuotannollisesti ja maantieteellisesti järkevästi. (Fingrid, 2017)



Kuva 17. Taajuusohjattu häiriöreservi varavoimakoneilla (Fingrid 2017).

Kylmävarastoissa on käytössä kylmäkoneita, höyrystimiä ja lauhduttimia, joilla suurissa kylmävarastoissa on myös suuri sähkönkulutus. Pakkasvarastot siis soveltuvat hyvin taajuusohjattuun käyttöreserviin. Pakkasvarastojen sähkönkulutuksen ohjaus lineaariseen tehon laskuun tai nostoon perustuu taajuuden jatkuvaan seurantaan. Tyypillisesti paikallinen ohjausjärjestelmä

voi ohittaa poikkeustilanteessa taajuusohjattuna käyttöreservinä toimimisen, mikäli pakkasvaraston lämpötila uhkaa nousta kylmälaitteiden tehon laskemisen johdosta. Suurissa pakkasvarastoissa on suuri joustopotentiaali ja aamu- ja iltapäivän kalliimman sähkökulutuksen ajaksi tehoja voidaan pienentää varaston käyttöpotentiaalin säilyessä ennallaan.

5 AKKUTEKNOLOGIA KYSYNTÄJOUSTOSSA

Tietoisuus ilmastonmuutoksesta on maailmanlaajuisia ja yhtenä ilmastonmuutoksen hidastamisen mallina pidetään energian tuotantotapojen muuttamista globaalisti. Erityisesti huipputehoa varten ylös ajettavien fossiilisia polttoaineita käyttävien sähköntuotantojen tilalle etsitään aktiivisesti ratkaisuja, joilla voidaan luonnon ekologista kuormitusta pienentää. Tätä tarkoitusta varten sähköä pitää pystyä varastoimaan tuotantohuippujen aikana ja vastaavasti luovuttamaan kulutushuippujen aikana. Myös kantaverkon kuormituksesta johtuen akustoja tarvitaan tasaamaan sähköverkon taajuusvaihteluita. Akkuteknologia onkin tulossa osaksi älykästä sähköverkkoa ja tulevaisuudessa sähköenergiavarastoja voidaan hyödyntää taajuusvaihteluiden tasaamisessa, sähkönkäytön siirtämisessä toiseen ajankohtaan sekä uusiutuvan energian varastoinnissa. Akustojen ja kulutuksen ohjaus yhdistettynä uusiutuvan sähköenergian tuotantoon muodostaa kokonaisuuden, jossa akustosta saadaan paras hyöty.

5.1 Erilaiset akustoratkaisut

Kotitalouksissa akkuteknologialla voidaan pienessä mittakaavassa toteuttaa useita erilaisia ratkaisuja. Yksinkertaisimmillaan akusto toimii uusiutuvan energian varastoinnin yhteydessä ladaten tuotantohuippujen aikana ja luovuttaen sähköenergiaa kulutuksen mukaisesti. Monimuotoisemmassa järjestelmässä akusto tasapainoilee paikallisen energiantuotannon, verkosta ostettavan energian, kysyntäjouston ja paikallisen kulutuksen välillä. Jotta tällainen monimuotoinen järjestelmä saadaan toimimaan luotettavasti, vaatii se paljon erilaista mittausta ja ohjausta. Kuvassa 18 seinään asennettu Teslan Powerwall 2 tarjoaa 14kWh kapasiteetin sekä vanhemmista lyijy-akustoteknologioista poiketen kotitalouksiin visuaalisesti ja sähköisesti hyvän kokonaisratkaisun. Akuston suunnittelussa on otettu huomioon sijoitusmahdollisuus sisä- ja ulkotiloihin, jotta akuston sijoittelu olisi mahdollisimman joustavaa. Tällainen yksittäinen akusto pienkiinteistössä tarjoaa mahdollisuuden osallistua kysyntäjoustopaikoilla aggregaattoreiden avulla.



Kuva 18. Tesla Powerwall 2 pientalon 14 kWh sähköenergiavarasto (Electrek 2017).

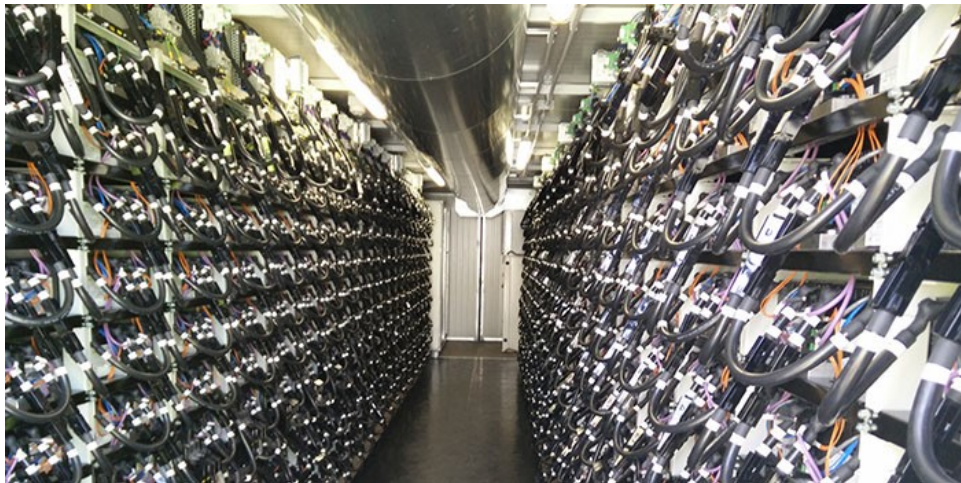
Sähköauton rooli korostuu osana tulevaisuuden älykästä sähköverkkoa, koska sähköauto muodostaa potentiaalisen liikkuvan sähkövaraston. Sähköauto voidaan kytkeä kotiin tullessa päivän aikana uusiutuvalla sähköenergialla ladattuun pientalon akustoon ja näin pientalon akusto ja sähköauton akusto muodostavat jo suuremman akustokokonaisuuden. Akustojen kapasiteettien kasvaessa ei sähköauton akusto ole aina tyhjä kotiin palatessaan ja näin ollen tarvittaessa sähköauton akusta pystytään tarjoamaan esimerkiksi iltapäivän kuormitushuipun aikana kysyntäjoustoa sähkömarkkinoille. Vastaavasti sähköauton akustoa voidaan ladata pientalon sähkövarastosta yön aikana akuston varaustilanteen salliessa tai vastaavasti sähköautoa voidaan ladata sähköverkosta halvemmallalla sähköllä kuin kuormitushuipun aikana.

Useasta samalla alueella älykkääseen sähköverkkoon kytketystä ajoneuvosta saadaan jo merkittävä joustava sähkövarasto kokonaisuus, josta BMW:n ratkaisumalli nähtävissä kuvassa 19. Ohjausparametrien määrittäminen on tärkeää ja pitää huomioida jo suunnittelussa ja mitoituksessa, että autolla ajamaan lähtiessä akuston varaustaso olisi riittävä.



Kuva 19. BMW:n sähköauto sähköenergiavarastona pientalossa (Green car reports 2016).

Sähköenergiavarastoja on saatavilla useassa kokoluokassa ja ne ovat mitoitettavissa valmistajan toimesta tarpeiden mukaisesti. Tyypillinen suuremman kokoluokan sähkövarasto koostuu kuvassa 20 näkyvällä tavalla useasta rinnan- ja sarjaan kytketystä akusta muodostaen halutun sähkövaraston kapasiteetin.



Kuva 20. Helenin sähkövarasto Suvilahdessa koostuu sadoista litium-ioni akuista. (Helen 2016.)

Suuremmat sähköenergiavarastot on pääosin rakennettu konttiin ja mahdollistavat moduulimaisen sähkövarastojen yhteen liittämisen. Kontteja voidaan rinnan ja sarjaan kytkeä halutun kapasiteetin saavuttamiseksi ja laajennuksia voidaan tehdä myös myöhemmässä vaiheessa tarpeiden muuttuessa. Kontit tarjoavat kustannustehokkaan ja tarvittaessa helposti huollettavissa olevan ratkaisun ja mahdollistavat akuston kokoonpanon suorittamisen tehtaalla ja siirto varsinaiseen sijoituspaikkaan voidaan tehdä helposti kuorma-autolla. Konttiin on yleensä jo integroitu tarvittavat ilmanvaihto- ja

jäähdytyslaitteistot sekä irtikytkentään tarvittavat laitteet. Yksi konttiin integroitu sähkövarasto malli on nähtävillä kuvassa 21.



Kuva 21. Fiamm:n konttiin rakennettu 1,4MWh sähköenergiavarasto (Adelaide Solar Services 2016).

Virtausakustot soveltuvat hyvin myös esimerkiksi yhden megawatin tuuli-voimalan yhteyteen. Tuulisella säällä tuulivoimala parhaimmillaan tuottaa 50 tunnin aikana niin paljon sähköenergiaa, että oikealla mitoituksella virtausakuston kanssa voimala pystyisi luovuttamaan 50 tuntia samalla teholla sähköenergiaa tyynellä säällä. Taloudellisesti tällaisen akuston kustannustehokas liittäminen järjestelmään ei ole ollut mahdollista. Tutkijoiden mukaan kuitenkin uudella tekniikalla tämän toteutus taloudellisesti on mahdollista. Tästä virtausakuston kehittyneestä versiosta uskotaan olevan apua aurinkokenno järjestelmien sähköenergian varastointiin myös esimerkiksi tulevaisuudessa kotitalouksissa. Kuvassa 22 on kuvattuna varauskapasiteetiaan suuria virtausakustoja.



Kuva 22. 1MW:n ja 4MW:n virtausakustot (UE Technologies 2016).

5.2 Investointikustannukset ja kannattavuus

Sähkövarastojen investointikustannukset ja takaisinmaksuaika vaihtelevat. Investointikustannukset määräytyvät pääosin sähkövaraston koon, käyttötarkoituksen, rakenteen ja toteutustavan mukaisesti. Suurista sähkövarastoista ei ole saatavilla listahinnastoja, koska suuremmat sähkövarastot rääh-

tälöidään asiakkaan tarpeen mukaisesti. Suuret sähkövarastot ovat yleisty-
mässä, mutta toistaiseksi kuitenkin vielä aika harvinaisia. Jokaisella raken-
nettavalla sähkövarastolla lasketaan olevan myös hieman markkinointiar-
voa, joka osaltaan myös saattaa muuttaa hinnoittelua asiakkaalle edullisem-
maksi. Esimerkiksi keskeinen sijainti, näkyvyys mediassa ja valmistajan
mainostekstit varaston yhteydessä saattavat vaikuttaa hinnoitteluun.

Kotitalouksiin sijoitettavan pienen lyijyakkuihin perustuvan sähkövaraston
voi rakentaa yksinkertaisimmillaan noin 400 € hintaan. Tässä hintaluokassa
järjestelmä koostuu tyypillisesti kahdesta 12 voltin sarjaankytketystä lyijy-
akusta ja invertteristä. Asennusvalmista kotitalouksiin tarkoitettua kapasiteetiltaan 14 kWh Teslan Powerwall 2 akustoa myydään 6500 euron hin-
taan, joten hintahaarukka akustojen välillä on aika laaja. Eroja eri ratkaisujen välillä syntyy erityisesti visuaalisuudessa sekä käyttöiässä. Suurempien sähkövarastojen hinnat vaihtelevat myös suuresti, mutta yleisellä tasolla Litium-ioni tai suolaliuos tekniikalla toteutettu 1 MWh sähkövarasto maksaa noin miljoona euroa yksittäisiä sähkövarastoja ostettaessa.

Sähköautot ovat tulevaisuudessa merkittävässä roolissa aggregaattoreiden ylläpitämässä kysyntäjoustopuolella ja omalta osaltaan vaikuttamassa kannattavuuteen. Sähköauton rooli on merkittävä erityisesti investointikustannusten näkökulmasta, koska suoraa investointikustannuksia sähkövarastoon ei teoriassa tule, mikäli sähkövaraston akustona toimii sähköauton akku. Tai ainakin teoreettisesti voidaan ajatella, että sähköauto ostetaan jollakin muulla perusteella kuin pelkästään sähköenergiavarastoksi. Tämä mahdollisuus lisää osaltaan kynnystä pientalon sähkövarastoon ja toisaalta sähköauton hankkimiseen. Tällaisella monikäyttöisyydellä saattaa olla suurtakin merkitystä auton hankintapäätöstä tehtäessä.

Kannattavuuden arviointi tulee tehdä kokonaisuutta arvioimalla ja juuri kyseiseen käyttökohteeseen. Akkuteknologiaa laajassa mittakaavassa hyödynnettäessä saattaa akuston ensisijainen käyttötarkoitus olla jokin muu kuin tarjota kysyntäjoustopuolella, mutta sitä voidaan käyttää tarvittaessa myös osana kysyntäjoustopuolella. Pelkästään taloudellisesta näkökulmasta katsottuna akkuteknologialla toimivan sähkövaraston rakentaminen ainoastaan kysyntäjoustopuolelle varten ei toistaiseksi ole kannattavaa. Toisaalta, jos uusiutuvalla energialla latautuvaa sähkövarastoa käytetään korvaamaan kiinteistön varavoimakonetta ja päästään osallistumaan kysyntäjoustopuolelle, on tilanne silloin toisenlainen.

Useammalla valmistajalla on saatavilla konttiin rakennettuja sähkövarastoja, jolla on saatu laskettua hieman rakenteista johtuvia kustannuksia ja varsinaista rakennustyötä on merkittävästi vähemmän kuin betonirakenteisella sähköenergiavarastolla. Suurien sähkövarastojen valmistajien lisääntymisen myötä on myös kilpailu valmistajien välillä lisääntynyt, joka vaikuttaa markkinahintaan.

Akkuteknologian kehittyessä uusia teknologioita tulee markkinoille koko ajan ja siitä syystä uusien akkuteknologioiden käyttöä ja sitä kautta kokonaiskustannusten arviointi on haastavaa, koska käyttökokemuksia pitkältä ajalta ei ole. Pääosin kaikki akut ovat huoltovapaita suunnitellun käyttöikänsä

puitteissa, mutta esimerkiksi suuremmissa sähkövarastoissa ulkoiset rakenteet ja lataus- /purkulaitteistoon liittyvät huoltotarpeet saattavat aiheuttaa ennakoimattomia suuriakin kustannuksia.

Uusien teknologioiden kehitys perustuu tyypillisesti teoreettisiin laskelmiin, joiden perusteena ovat kemialliset ja fyysiset ominaisuudet kyseisessä ratkaisumallissa. Kokonaishintaa ja mahdollista takaisinmaksuaikaa on vaikea arvioida luotettavasti, kuitenkin tämän hetkisiin tietoihin perustuen sähkövarastot eivät maksa itseään takaisin kysyntäjoustoprojektin osallistumalla. Sähkömarkkinat ovat murroksessa liittyen paikallisen sähköntuotannon lisäämiseen ja sitä kautta siirtoverkkojen suoranaisesta sähkönsiirrosta saatavien tulojen ennustettuun laskemiseen. Sähkönsiirtoyhtiöillä saattaa olla edessä hinnoittelumallin muuttaminen siirretyn sähköenergian määrään perustuvan hinnoittelun muuttamiseksi esimerkiksi sähköverkon liittämispisteen sulakekokoon perustuvaksi. Tämä muuttaisi osaltaan pientalojen paikallisen sähkövarastoinnin ja uusiutuvan energian tuotannon kannattavuutta.

Tyypillisesti jokainen kohde on hieman erilainen ja tästä syystä valmista kaikille optimaalista ratkaisua ei ole. Jokaisessa kohteessa tulee punnita ratkaisuja ekologisuuden, budjetin, käyttövarmuuden ja tarpeiden mukaan. Näiden perusteella voidaan jokaiseen kohteeseen muodostaa paras mahdollinen ja oikein mitoitettu ratkaisu, joka viime kädessä määrittelee kannattavuuden.

6 YHTEENVETO

Markkinoilla vallitsevan tilanteen perusteella älykkään sähköverkon käsitteen ympärille on voitu yhdistää tavalliseen automaatiotekniikkaan perustuvia ratkaisuja, joita kuitenkin markkinoidaan älykkäinä ratkaisuuina. Nykypäivänä kyseiset järjestelmät eivät vielä kuitenkaan kykene varsinaiseen ongelmanratkaisuun tai oppimaan itsenäisesti uusia toimintoja, joten älykkäs sähköverkko tieteellisenä käsitteenä on hieman kyseenalainen kuvaus. Kokonaisuutena voidaan kuitenkin todeta, että kehittyneet järjestelmät pystyvät tehokkaasti ennakoimaan ja optimoimaan sähköverkon toimintaa.

Sähkön varastointi automaatiotekniikan ja akkuteknologian kehittyessä tulee olemaan osa tulevaisuuden monimuotoisia energijärjestelmiä, tämä on jo nyt nähtävissä. Ennusteiden mukaan akkuteknologia sähköverkoissa tulee lisääntymään ja suurien sähkövarastojen rakentamisen lisäksi mielenkiintoa kohdistuu nyt myös pienempiin kokonaisuuksiin. Akkuteknologiaa tullaan hyödyntämään tulevaisuudessa monimuotoisesti, ei ainoastaan kysyntäjoustoprojektin tai uusiutuvan energian varastointiin, vaan osana laajempia sähkövarastointiin liittyviä järjestelmäkokonaisuuksia. Aggregaattoreiden muodostamat kokonaisuudet tulevat olemaan tärkeä osa kysyntäjoustopotentiaalia tulevaisuudessa.

Kiinteistöissä entistä monimuotoisemmat ja ennakoivat ohjaukset lisääntyvät koko ajan. Suomessa kiinteistöihin liittyvät rakennusmääräykset ja niiden kehitys tulevaisuudessa määrittelevät paljonkin, miten sähköjärjestelmät kehittyvät ja mikä on kehityksen nopeus. Mikäli rakennusmääräykset

määrittäisivät sähkökeskuksissa pakollisiksi liityntä- ja kytkentämahdollisuus paikalliselle sähköntuotannolle, liitynnät sähkövarastoinnille ja liitynnät kysyntäjoustoparvitelemalla ohjausautomaatiolle, lisäksi tämä varmasti paikallisen sähkövarastoinnin ja tuotannon yleistymistä.

Sähköautojen akkuteknologian kehittymisen myötä sähköautojen akkukapasiteettia tullaan hyödyntämään osana sähköverkkoa sähkövarastona. Sähköautojen valmistajilla on jo järjestelmiä, joilla voidaan sähköauto akkuihin liittää osaksi sähköverkkoa ja hyödyntää sähköauton akun varauskapasiteettia esimerkiksi kysyntäjoustoparvitelemalla tai vastaavasti liittää osaksi kiinteistön varauskapasiteettia. Sähköautojen yleistyminen ja sähköautojen akkujen varauskapasiteetin kasvaminen on todennäköisesti merkittävä askel kohti monimuotoisempia kysyntäjoustoparvitelemarkkinoita.

Kysyntäjoustoparvitelemalla on teollisuudessa tunnettu ja käytössä, mutta pienemmille järjestelmille kysyntäjoustoparvitelemat ovat vielä saavuttamattomissa tai taloudellisesti kannattamattomia. Aggregaattoreiden pitää saada riittävästi kysyntäjoustoparvitelemat, jotta markkinat saadaan kiinnostumaan kyseisestä kapasiteetista. Tässä aggregaattoreiden kapasiteetin saavuttamisessa sähköautojen rooli voi olla merkittävä tulevaisuudessa.

Akkuteknologioita ja sähköenergian erilaisia varastointimahdollisuuksia tutkitaan kehityshankkeilla maailman laajuisesti. Tästä johtuen uusia innovaatioita ja tutkimustuloksia on nähtävissä. Pääsääntöisesti suuret sähkövarastot ovat valtiollisella tasolla tuettuja hankkeita, koska korkeahkoista rakennuskustannuksista johtuen sähkövarastojen rakentamisen kannattavuus pelkästään taloudellisesta näkökulmasta on kyseenalaista. Sähkövarastoja kuitenkin voidaan hyödyntää sähköverkon taajuusvaihteluiden kompensointiin ja verkkoyhtiöillä on selkeästi kiinnostusta olla tutkimassa ja kehittämässä sähkövarastoja sekä pysyä ajan tasalla teknologioiden kehityksessä. Kysyntäjoustoparvitelemat ovat kasvamassa akkuteknologian kehityksen myötä.

LÄHTEET

Adelaide Solar Services (n.d.). Fiammin sähköenergiavarasto. Haettu 5.3.2017 osoitteesta

<http://adelaidesolarservices.com.au/index.php/battery-storage/fiamm-sonick-batteries/fiamm-industry-energy-storage.html>

Batteryuniversity (2016). An overview of battery markets. Haettu 6.11.2016 osoitteesta

http://batteryuniversity.com/learn/article/global_battery_markets

Bosch (2015). Akkuteknologian viisivuotiskehityssuunnitelma. Haettu 18.1.2017 osoitteesta

<https://www.uusisuomi.fi/autot/126538-uusi-akkuteknologia-pidentaa-sahkoautojen-ajomatkoja>

Linden, D. & Reddy, T. (2001). *Handbook of batteries 3rd edition*. New York: McGraw-Hill.

Elfi (n.d.). Kysyntäjoustopaikat. Haettu 5.2.2017 osoitteesta

<http://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkonkayton-kysyntajousto/>

Electrek (2017). Tesla Powerwall 2, pientalon sähköenergiavarasto. Haettu 6.3.2017 osoitteesta

<https://electrek.co/2017/02/17/tesla-powerwall-2-gigafactory/>

Exide (n.d.). Akkujen teknisiä ominaisuuksia. Haettu 18.3.2017 osoitteesta

https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj1xLrJ8t_SAhXIB8AKHaAHAf0QFgg-XMAA&url=http%3A%2F%2Fexide.fi%2Fwp-content%2Fuploads%2Fsites%2F15%2F2014%2F11%2FExide_fi_Teknisk_info.pdf&usq=AFOjCNGj3eOAY-GTBm7UmTkCT5MbcaHF3_g&bvm=bv.149760088,d.bGs&cad=rja

Fingrid (n.d.). Kysyntäjoustopaikat. Haettu 30.1.2017 osoitteesta

<http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/Kysyntajousto/Sivut/default.aspx>

Fingrid (2015). Taajuusohjattu häiriöreservi varavoimakoneilla. Haettu 5.2.2017 osoitteesta

http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Kysynt%C3%A4jousto/VV_pilotti_raportti_Enegia_05_2015_julkinen_versio.pdf

Fortum (2017). Fortumin sähkövarasto. Haettu 18.3.2017 osoitteesta

<http://www.fortum.com/fi/media/pages/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kaytoon-jarvenpaassa.aspx>

Green car reports (2016), BMW:n sähköajoneuvo sähkövarastona pientalossa. Haettu 5.3.2017 osoitteesta

http://www.greencarreports.com/news/1104656_bmw-electric-car-batteries-to-be-used-as-home-energy-storage-devices

Helen (2016). Suvilahden sähkövarasto tositoimissa. Blogijulkaisu 15.8.2016. Haettu osoitteesta

<https://www.helen.fi/helen-oy/ajankohtaista/blogi/2016/suvilahden-sahko-varasto-tositomissa/>

Nanobittejä (2014). Kun aurinko ei paista ja tuuli ei puhalla. Haettu 13.3.2016 osoitteesta

<http://www.nanobitteja.fi/uutiset.html?a100=372>

Pientalon älykäs sähköverkko (2016). Haettu 16.9.2016 osoitteesta

<https://electrek.co/2016/04/08/tesla-begins-alerting-1st-general-us-power-wall-customers-installations-starting-in-june/>

Polar Heater (n.d.). Lyijynesteakun poikkileikkauskuva. Haettu 5.2.2017 osoitteesta

<http://www.polarheater.fi/files//poikkileikkaus.jpg>

Redflow Limited (n.d.). 10 kWh virtausakusto. Haettu 9.1.2017 osoitteesta

<http://redflow.com/products/redflow-zbm-2/>

Research Gate (n.d.). Natrium-rikkiakun rakenne. Haettu 1.3.2017 osoitteesta

https://www.researchgate.net/figure/220037284_fig6_NaS-battery-6566

Shenzen Institute of Advanced Technology (n.d.). AGDIB-akku.

Haettu 18.1.2017 osoitteesta

http://english.siat.cas.cn/Research_2015/rp_2015/201603/t20160325_160959.html

Siemens (n.d.). Teollisuus 4.0. Haettu 4.4.2017 osoitteesta

http://www.siemens.fi/fi/industry/teollisuus/teollisuus_4_0.htm

Tekniikka & Talous (2014). Orgaaninen akku varastoi uusiutuvaa sähköä. Haettu 13.3.2016 osoitteesta

<http://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/2014-01-09/Orgaaninen-akku-varastoi-uusiutuvaa-s%C3%A4hk%C3%B6%C3%A4-%E2%80%93matkii-raparperia-3317115.html>

Tesla Motors (n.d.). Supercharger –latauspisteen latausajat. Haettu 8.3.2016 osoitteesta

https://www.teslamotors.com/fi_FI/models-charging#/ontheego

There Corporation (2016). Kodin energianhallintajärjestelmä. Haettu 5.2.2017 osoitteesta

<http://www.fingrid.fi/fi/sahkomarkkinat/markkinaliitteet/Kysynt%C3%A4jousto/Kysynna%CC%88njouston%20pilottiprojekti%20Loppuraportti%20Julkinen.pdf>

TTI Europe (2016). Eaton 48V XLR superkondensaattori. Haettu 1.3.2017 osoitteesta

<http://www.ttieurope.com/docs/IO/42504/XLR-Product-Profile.pdf>

UE Technologies (n.d.). 1MW:n ja 4MW:n virtausakusto. Haettu 7.12.2016 osoitteesta

<http://www.uetechologies.com/>

Wikispaces (n.d.). Sähköparin toimintaperiaate. Haettu 1.2.2017 osoitteesta

<https://fy62.wikispaces.com/S%C3%A4hk%C3%B6pari>

3M (n.d.). Älykäs sähköverkko. Haettu 19.1.2017 osoitteesta

[http://solutions.3m.com/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1385528401000&lo-](http://solutions.3m.com/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1385528401000&locale=rg_EU&assetType=MMM_Image&assetId=1319247120008&blobAttribute=ImageFile)
[cale=rg_EU&assetType=MMM_Image&assetId=1319247120008&blobA](http://solutions.3m.com/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1385528401000&lo-)
[ttribute=ImageFile](http://solutions.3m.com/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1385528401000&lo-)