

Tomi Nokelainen

Akkupohjaisten energiavarastojen käyttösovellukset tulevaisuuden sähköverkoissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

24.4.2013

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Tomi Nokelainen Akkupohjaisten energiavarastojen käyttösovellukset tulevaisuuden sähköverkoissa 46 sivua + 3 liitettä 24.4.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	myyntipäällikkö, Siemens Oy, Smart Grid Division, Marko Ruotsalainen lehtori, Metropolia Ammattikorkeakoulu, Sampsa Kupari
<p>Insinööriyössä selvitettiin akkuteknologiaan perustuvan energiavaraston käyttösovellukset Suomen olosuhteissa ja tutkittiin kaupallistamiseen liittyviä haasteita. Työssä selvitettiin myös sähkövaraston mitoituseriaa käyttösovelluksissa.</p> <p>Työssä kartoitettiin sähköenergian varastointimenetelmiä ja arvioitiin niiden nykyisiä haasteita sekä tulevaisuuden mahdollisuuksia. Energiavarastojen käyttösovelluksia tutkittiin lukemalla julkaisuja monesta eri lähteestä ja tarkastelemalla toteutuneita sähkövarastoprojekteja. Kaupallistamisen haasteita arvioitiin Suomessa ja ulkomailla tehtyjen markkina- ja teknologiatutkimusten perusteella. Akkupohjaisen energiavaraston mitoitusta ja kustannustehokkuutta tutkittiin ohjelmistolla, joka on tehty tukemaan energiavaraston valintapäätöstä. Akkuvaraston soveltuvuutta varavoimakäyttöön sairaalaympäristössä selvitettiin haastatteleamalla Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiiriin (HUS) sähkönkäyttöpäällikköä.</p> <p>Tehokkaalle sähköenergian varastoinnille on tarvetta Suomen olosuhteissa. Sähköverkon kasvava taajuuden vaihtelu, uusiutuvan energian tuotantotapojen lisääminen, tavoitteet vähentää liikenteen päästöjä ja energiatehokkuuden parantaminen ovat haasteita, joihin muun muassa akkuihin perustuvalla energiavarastolla voitaisiin vastata. Tämä kuitenkin edellyttää, että energiavaraston kustannukset ovat järkevällä tasolla saataviin hyötyihin verrattuna.</p> <p>Tehdyn tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että sähkön varastoinnin avulla on mahdollista sopeutua sähköverkoissa tapahtuviin muutoksiin. Tulevaisuudessa eri akkuteknologioihin perustuvien energiavarastojen osuus on luultavasti huomattava muiden varastointimenetelmien rinnalla. Akkupohjaisella energiavarastolla on monia käyttösovelluksia, kuten taajuuden säätö, huipputehon tasoittaminen ja tuulivoiman tuotannon tasoittaminen. Akkuvaraston kannattavuus paranee, kun varastoa käytetään useaan eri sovellukseen. Sähkövaraston mitoitus ja teknologian valinta riippuvat varaston käyttötarkoituksesta ja sijainnista sähköverkossa.</p>	
Avainsanat	akkupohjainen energiavarasto, sähkövarasto, akkuvarasto

Author Title Number of Pages Date	Tomi Nokelainen Battery Energy Storage Applications for Electric Grid of the Future 46 pages + 3 appendices 24 April 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Marko Ruotsalainen, Sales Manager Sampsa Kupari, Senior Lecturer
<p>This thesis examines applications for an electric energy storage based on secondary batteries, especially deployed at Finland's electric network. The challenges of commercializing the energy storage were also researched in the study and the dimensioning principles of the energy storage were clarified.</p> <p>In this study, the electric energy storage technologies were surveyed and their present challenges and future opportunities assessed. Applications for the energy storage were studied by reading publications from multiple sources and examining already deployed energy storage projects. Challenges of commercializing were estimated on the basis of market and technology reports conducted in Finland and abroad. Dimensioning and cost-efficiency of the battery storage were studied with software designed to support the selection of an energy storage technology. Also an interview was made to clarify battery storages' suitability to back up the hospitals power generation in a case of electric black out. The interviewee was the electric operations manager of the Hospital District of the Helsinki and Uusimaa (HUS).</p> <p>There is a need for efficient electricity storage in Finland's environment. Growing fluctuations in network frequency, increasing renewable energy production, goals to decrease emissions, also in traffic, and improving energy efficiency are challenges where battery storage could be an answer. However, this requires costs of the energy storage to be on a reasonable level compared to the benefits.</p> <p>Based on the research done, it can be concluded that by means of storing electric energy, it is possible to adapt to the changes in the electric grid. Energy storages, based on different secondary battery technologies, could account for a significant part among other energy storage technologies in the future. Battery-based energy storage has many applications, such as frequency regulation, controlling peak-power and balancing the wind power generation. Profitability of energy storage will improve when the storage is used for more than one application. Dimensioning and selection of the storage technology depends on the intended use and location in the grid.</p>	
Keywords	battery energy storage, electric energy storage, battery storage

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Energian varastointi	2
2.1	Energian varastointimenetelmät	2
2.1.1	Akku	2
2.1.2	Pumpatut vesivarastot	3
2.1.3	Paineilmavarastot	3
2.1.4	Vauhtipyörä	5
2.1.5	Superkondensaattori	5
2.1.6	Suprajohtavat magneettiset energiavarastot	6
2.1.7	Vetyvarasto	7
2.2	Varastointimenetelmien vertailu	8
2.3	Energian varastoinnin hyödyt	11
3	Akkuteknologiat	11
3.1	Akkuteknologioiden vertailu	14
3.2	Lupaavia tulevaisuuden akkuteknologioita	15
3.2.1	Litiumioni-akun tulevaisuuden näkymiä	16
3.2.2	Vanadium-akun kehittäminen	16
4	Akkupohjainen sähkövarasto	17
4.1	Akkupohjaisen sähkövaraston rakenne	17
4.2	Akkutekniikan turvallisuus	20
5	Sähkövaraston käyttösovellukset tulevaisuuden sähköverkossa	21
5.1	Uusiutuvan energian tuotannon vakauttaminen	21
5.2	Kulutuksen ja tuotannon tasoittaminen	22
5.3	Huipputehon välttäminen	23
5.4	Verkkotaajuuden säätö	23
5.5	Sähkön laadun parantaminen	24
5.6	Varavoima sairaalaympäristössä	25

5.7	Verkon laajentamisen välttäminen	26
5.8	Sähkövarasto saarekekäytössä	26
5.9	Sähköautot	27
5.10	Raideliikenne	28
6	Akkupohjaisen energiavaraston valinta ja mitoitusperiaatteet	28
6.1	Akuston mitoitus sairaalan UPS-käyttöön	28
6.2	Tuulivoimalan tuotannon tasaus	29
6.3	Mitoitus energiavaraston valintatyökalulla	30
7	Akkupohjaisen energiavaraston kaupallistaminen	32
7.1	Sähkövaraston markkinat ja tulevaisuuden näkymät	33
7.2	Tuulivoiman vaikutus sähkövaraston tulevaisuuteen	34
7.3	Akkuvaraston kustannustehokkuus	36
7.4	Sähköauton akkujen uusiokäyttö	38
7.5	Energian varastointijärjestelmien standardisointi	38
8	Yhteenveto	39
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. ES-Select-ohjelman toiminnot	
	Liite 2. ES-Select-ohjelman käyttämät kaavat	
	Liite 3. ES-Select-ohjelman käyttämät taloudelliset parametrit	

Lyhenteet

AA-CAES	<i>Advanced Adiabatic-Compressed Air Energy Storage.</i> Paineilmavarasto, jossa hyödynnetään paineistamisessa syntynyt lämpö.
BEV	<i>Battery Electric Vehicle.</i> Sähköautoissa käytettävät akut.
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage.</i> Paineilmalla toimiva energiavarasto.
DLC	<i>Double Layer Capacitor.</i> Superkondensaattori.
EES	<i>Electrical Energy Storage.</i> Sähkövarasto.
FES	<i>Flywheel Energy Storage.</i> Vauhtipyörä, liike-energian varasto.
H2	<i>Hydrogen Storage.</i> Vetyvarasto.
Hybrid	Lyijyakun ja superkondensaattorin yhteiskäyttö.
LA-adv	<i>Advanced Lead Acid.</i> Kehittynyt lyijyakku.
LA	<i>Lead Acid.</i> Lyijyakku.
Li - ion	<i>Lithium - ion.</i> Litiumioni-akku.
NaS	<i>Sodium Sulfur Battery.</i> Natrium-rikki-akku.
NiCd	Nikkeli-kadmium-akku.
NiMh	Nikkeli-metallihydridi-akku.
NiZn	Nikkeli-sinkki-akku.
PHS	<i>Pumped Hydro Storage.</i> Pumpattu vesivarasto.

RFB	<i>Redox Flow Battery.</i> Virtausakku.
SNG	<i>Synthetic Natural Gas.</i> Synteettinen maakaasu.
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage.</i> Suprajohtava magneettinen energiavarasto.
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply.</i> Keskeytymätön tehonsyöttö.
V2G	<i>Vehicle "to" Grid.</i> Sähköautojen muodostama energiavarasto, tai käyttösovellus, jossa sähköä syötetään sähköautosta sähköverkkoon.
VRLA	<i>Valve Regulated Lead Acid.</i> Suljettu lyijyakku.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä käsitellään sähköenergian varastointia ja keskitytään tarkemmin akkuteknologiaan perustuvaan energiavarastoon. Työssä selvitetään akkupohjaisen energiavaraston käyttösovellukset erityisesti Suomen sähköverkossa, ja tutkitaan energiavaraston kaupallistamiseen liittyviä haasteita. Työ tehtiin Siemens Osakeyhtiölle, joka on maailmanlaajuisen Siemens AG:n omistama tytäryhtiö. Siemens Osakeyhtiö toimii Suomen lisäksi Virossa, Latviassa ja Liettuassa. Siemens Oy:n liiketoimintaan kuuluu tuotteiden ja palveluiden toimittaminen teollisuuteen, infrastruktuuriin, terveydenhuoltoon ja energiantuotantoon.

Yhteiskunnan tavoitteet ympäristöystävälliseen energiantuotantoon, energiatehokkaampaan teollisuuteen ja puhtaampaan liikenteeseen luovat tarpeen kehittää energian varastointimenetelmiä. Päästötön liikenne edellyttää sähköautojen kehitystä, ja sähköautoja varten tarvitaan tehokkaita sekä turvallisia akkuja. Akustoja voidaan käyttää myös suuren energiamäärän varastoimiseen, mikä on nykyään vielä harvinaista. Toistaiseksi akkuteknologian haasteena on kustannustehokkuus. Akkukäyttöisen sähkövaraston tekninen ja taloudellinen valmius on kokeiluasteen ja kaupallistumisen välimaastossa, riippuen akkuteknologiasta. Akkuteknologian jatkuva kehitys- ja tutkimustyö tukee sähkövarastojen roolia tulevaisuuden sähköverkoissa. Nykyään käytetyin energian varastointimenetelmä on pumpatut vesivarastot.

Energian varastoimisen merkitys korostuu, kun hiilidioksidipäästöjä aiheuttavia sähkön tuotantotapoja pyritään vähentämään. Uusiutuvan energian tuotanto on riippuvainen vallitsevista sääolosuhteista. Tuuli- tai aurinkoenergialla tuotetun sähkötehon määrä vaihtelee paljon ja satunnainen sähkön tuotanto aiheuttaa epävakautta sähköverkossa. Sähkön tuotannon tulisi aina vastata kulutusta, joten tuotantoa tai kuormitusta täytyy säätää tilanteen mukaan. Tuulivoiman tuotannon alassäätö on käytännössä energian tuhlausta. Sen sijaan uusiutuvaa energiaa kannattaa varastoida silloin, kun sitä on saatavilla ja luovuttaa vasta tarvittaessa.

Sähkön varastoinnilla saadaan joustavuutta sähköverkkoon. Joustavuudella tarkoitetaan sähköverkon kykyä reagoida tuotannon ja kulutuksen muutoksiin. Akkuteknologiaan perustuvalla energiavarastolla voidaan tasoittaa tuotannon ja kulutuksen muutoksia ja osallistua taajuuden säätöön.

2 Energian varastoiminen

Energia voi esiintyä monessa eri muodossa kuten sähköenergiana, mekaanisena energiana tai kemiallisena energiana. Missään prosessissa energiaa ei koskaan häviä lopullisesti, sillä se vain muuttaa muotoaan. Esimerkiksi osa liike-energiasta muuttuu lämpöenergiaksi moottorissa olevan kitkan vuoksi.

Energian talteenotto perustuu energian muuttamiseen muodosta toiseen varastoinnin ajaksi. Energian muodon muuttamisella tarkoitetaan esimerkiksi sähköenergian muuttamista mekaaniseksi tai kemialliseksi energiaksi. Energiavarasto voi perustua eri teknologioihin, mutta käyttötarkoitus on aina sama. Tarkoitus on yksinkertaisimmillaan ottaa energiaa talteen ja luovuttaa sitä myöhemmin.

2.1 Energian varastointimenetelmät

Tässä työssä sähkövarastolla tarkoitetaan energiavarastoa, jossa sähköenergia muutetaan varastoinnin ajaksi toiseen muotoon ja luovutettaessa takaisin sähköenergiaksi. Energiavarasto on laajempi käsite ja kattaa myös varastot, joista voidaan luovuttaa esimerkiksi lämpöenergiaa. Seuraavaksi luodaan yleiskatsaus vain sähkövaraston kannalta oleellisiin energian varastointimenetelmiin.

2.1.1 Akku

Hyvin tunnettu menetelmä varastoida sähköenergiaa on akku, joka eroaa paristosta sen uudelleen ladattavuuden vuoksi. Kun akkua ladataan, sähköenergia muutetaan kemialliseksi energiaksi ja purettaessa takaisin sähköenergiaksi. Akun elinikä voidaankin määrittellä lataus- ja purkauksetojen eli syklien perusteella tai kokonaisikä. Yksi sykli tarkoittaa akun täyteen lataamista ja tyhjäksi purkamista. Esimerkiksi sähköauton akun syklisen elinkaaren katsotaan olevan lopussa, kun varautumiskykyä on jäljellä noin 80 % alkuperäisestä. Akun kokonaisuudella tarkoitetaan vuosimäärää, jonka akun odotetaan kestävän käyttökelpoisena. Käyttösovellus määrittelee käytettävän akun teknologian ja ominaisuudet, joita käsitellään myöhemmin. (Ks. 3 Akkuteknologiat) [1, s. 4.]

Akut ovat hyvin yleisesti käytössä elektroniikkalaitteissa ja ajoneuvoissa. Elektroniikkalaitteiden kuten matkapuhelinten ja tietokoneiden akut kehittyvät koko ajan. Ne kestävät kauemmin samalla, kun niiden fyysinen koko pienenee. Akkujen kehitys on merkittävää sähköautojen yleistymisen kannalta. Sähköauton suurimpia haasteita ovat olleet akun turvallisuus, tehokkuus ja hinta. [2, s. 1.]

2.1.2 Pumpatut vesivarastot

Pumpattu vesivarasto perustuu korkealla sijaitsevan vesimassan potentiaalienergiaan, joka muutetaan sähköenergiaksi generaattorilla. Alas virratessaan vesi pyörittää turbiinia, joka pyörittää sähkögeneraattoria. Pumpatun vesivaraston toimintaperiaate on pumpata alempana oleva vesi ylhäällä olevaan varastoon silloin, kun sähkön kulutus on vähäistä. Kun kulutus kasvaa, vettä lasketaan alas ja tuotetaan sähköä, jonka hinta on korkeampi kuin ylös pumppaamiseen käytetyn sähkön hinta. [1, s. 15.]

Vettä voidaan varastoida suuria määriä ja pitkiä aikoja, minkä vuoksi saadaan tarvittaessa suurtakin vara- tai säätövoimaa. Tällainen pumpattu vesivarasto voidaan toteuttaa kahdella erillisellä vesialtaalla, joilla on korkeuseroa, tai käyttämällä merta alempana vesivarastona. Toiseksi mainitulla tavalla rakennettiin 30 MW:n suuruinen vesivarasto Japaniin jo vuonna 1999. Vaikka vesivaraston toteuttaminen on kallis ja pitkäkestoinen projekti, se on nykyään tehokkain ja käytetyin sähköenergian varastointimuoto. Maailmanlaajuisesti pumpattua vesivoimaa on käytössä yli 100 GW. [3; 4, s. 4.]

2.1.3 Paineilmavarastot

Kansainvälisesti paineilmavarasto tunnetaan nimellä CAES (engl. *Compressed Air Energy Storage*). CAES-laitoksissa käytetään kompressoreita ilman paineistamiseen ja varastoimiseen. Ilma voidaan varastoida maanalaisiin ja luonnonmukaisiin muodostelmiin. Käyttämällä hyväksi suolakivi- tai suolavesiesiintymät sekä käytöstä poistetut kaivokset, säästetään kustannuksia. CAES-laitoksissa hyödynnetään sähkön hinnan vaihtelua, joka riippuu sähkön kysynnästä. Yöaikaan sähkön kulutus on pienempää kuin päivällä, joten yösähkö on jonkin verran edullisempää. Kun sähkön kulutus on vähäisempää, sähköä käytetään ilman paineistamiseen. Kulutuksen kasvaessa sähkön hinta nousee, jolloin ilmaa vapautetaan varastosta. Paineilma

pyörittää turbiinia, joka pyörittää sähkögeneraattoria. Tuotettu sähkö on siis arvokkaampaa kuin varastoitumiseen käytetty sähkö. Paineilmavarastoihin voidaan varastoida suuria energiamääriä, mutta hyötysuhde ei ole kovin hyvä. Varastoinnin aikana osa paineistamiseen käytetystä energiasta muuttuu lämmöksi. Ilman vapauttamisen yhteydessä ilmaa täytyy lämmittää, jotta se laajenee ja pyörittää tehokkaammin turbiinia. Jos paineistamisessa syntynyttä lämpöä ei voida hyödyntää, laitoksen hyötysuhde voi jäädä alle 70 %:iin. [1, s. 13–14; 4, s. 5.]

CAES-laitoksesta on kehitteillä tehokkaampi versio, AA-CAES (engl. *Advanced Adiabatic-CAES*), jossa paineistamisessa syntynyt lämpö otetaan talteen. Varastoituu lämpö käytetään hyväksi, kun ilmaa vapautetaan varastosta. Silloin ei tarvita ulkoista lämmönlähdettä ilman laajentamiseen ennen turbiinia. Haasteena uudessa versiossa on tehokkaan lämmönvarastointijärjestelmän kehittäminen. Kun ilma paineistetaan 60–70 Bar:iin, lämpötila nousee hyvin nopeasti (jopa 650 °C:een), ja sen käsittely vaikeutuu. [5.]

CAES ja AA-CAES -laitosten lisäksi on suunniteltu paineilmavarasto, joka käyttää hyödyksi veden painetta. Laitos koostuu useista meren pohjaan kiinnitetystä joustavista varastoista, jotka muistuttavat muotonsa puolesta kuumailmapalloa. Vedenalaisen paineilmavaraston pääkomponentit ovat kompressori, lämmönvarastointijärjestelmä ja ilmavarastot. Kompressori on veden pinnalla lämmönvarastointijärjestelmän kanssa. Kompressori ottaa ympäristöstä ilmaa ja paineistaa sen meren pohjassa vallitsevaan paineeseen. Paineistamisessa syntynyt lämpö varastoidaan eristettyyn lämmönvarastointijärjestelmään ja hyödynnetään myöhemmin. Ilma johdetaan vedenalaisiin joustaviin ilmavarastoihin, jotka laajenevat täytyessään. Kun sähkön kysyntä kasvaa, prosessi tehdään päinvastaisesti. Veden suuri paine pakottaa varastoissa olevan ilman takaisin pintaan, jossa se virtaa lämmönvarastointijärjestelmän läpi. Lämpö saa ilman laajenemaan, ja lämmin ilma pyörittää turbiinia, joka pyörittää generaattoria. [6.]

Vedenalainen sähkövarasto voisi tehostaa merellä sijaitsevan tuulivoimalan tuotantoa. Jos merituulivoimalan yhteyteen olisi mahdollista rakentaa vedenalainen paineilmavarasto, sillä voitaisiin korvata vähätuulisen jakson aiheuttamaa tuotannon vajetta. Sähköverkossa täytyy olla tehotasapaino, eli kulutuksen täytyy vastata tuotantoa. Tuulen voimakkuus vaihtelee paljon, minkä vuoksi vähätuulisella ajanjaksolla tarvitaan korvaavaa sähköntuotantoa. Kun tuulivoimala ei voi syöttää

enempää tehoa verkkoon, voitaisiin ylimääräisellä teholla ajaa kompressoria, joka varastoi energian mekaaniseen muotoon vedenalaisiin paineilmavarastoihin. Jos tuuli on heikkoa, ja tarvitaan lisää tehoa verkkoon, se voidaan syöttää paineilmavarastosta. Käytännössä idea vaatii perusteellisempaa tutkimusta, mutta uusiutuvan energian tuotantotapojen lisääntyessä tarvitaan myös keinoja tehotasapainon ylläpitämiseksi.

2.1.4 Vauhtipyörä

Sähköenergiaa voidaan muuttaa myös liike-energiaksi varastoimisen ajaksi. Vauhtipyörä koostuu moottori-generaattorista, roottorista, magneettisista laakereista ja laitetta suojaavasta kuoresta. Sähköenergiaa muutetaan liike-energiaksi, kun sähkömoottori pyörittää sen akselille kiinnitettyä kiekon muotoista roottoria. Roottorin pyörimisnopeus voi nousta 30 000–50 000 kierrokseen minuutissa. Kun roottori jätetään pyörimään laakeriensa varaan ilman sähkömoottorin tuottamaa momenttia, sillä on pyörivän massansa vuoksi tietty kineettinen pyörimisenergia

$$E_{kin} = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad (1)$$

jossa J on roottorin hitausmomentti ja ω kulmanopeus. Toisin sanoen tämän pyörimisenergian varastointiaika ja -tehokkuus riippuvat roottorin hitausmomentista ja käytännössä laakerien ja roottorin välisestä kitkasta. Kitkan minimoimiseksi käytetään magneettisia laakereita, joiden ansiosta saavutetaan noin 85 %:n hyötysuhde.

Pyörimisenergia muutetaan takaisin sähköenergiaksi kytkemällä roottori pyörittämään generaattoria. Vauhtipyörällä voidaan tuottaa useiden megawattien suuruinen teho, mutta niin suurella teholla purkaus aika on vain sekunteja. Vauhtipyörän ominaisuudet sopivat esimerkiksi lyhytaikaiseen varavoimakäyttöön tai sähköverkon jännitepiikkien tasoittamiseen. [1, s. 15–19; 7, s. 9–10.]

2.1.5 Superkondensaattori

Superkondensaattori on energiavarasto, jonka toimintaperiaate on samantapainen kuin akussa (ks. 3 Akkuteknologiat). Akussa ja superkondensaattorissa energia varastoituu sähkökemiallisesti. Akussa ja tavallisessa kondensaattorissa on sähkökenttä kahden elektrodin välillä, mutta superkondensaattoriin muodostuu kaksi sähkökenttää.

Superkondensaattorissa elektrodien välissä on erotinkalvo, joka päästää ioneja läpi. Erottimen molemmille puolille syntyy vastakkaisuuntaiset sähkökentät. Elektrodien pinta-ala on maksimoitu huokoisen materiaalin avulla, minkä ansiosta superkondensaattorilla on suuri energiatiheys. Elektrodien välissä oleva johtava aine, elektrolyytti, voi olla nestettä tai kiinteää ainetta. [8, s. 23, s. 37.]

Superkondensaattoreita voidaan käyttää sähkön varastointiin muun muassa junaliikenteessä. Kun juna saapuu asemalle, sen jarrutusenergia syötetään asemalla olevaan superkondensaattorivarastoon. Varastoitua jarrutusenergiaa voidaan myöhemmin käyttää junan kiihdytyksessä. Myös akkukäyttöisiä sähkövarastoja käytetään vastaavalla tavalla raideliikenteessä (ks. 5.9 Raideliikenne). [9; 10.]

2.1.6 Suprajohtavat magneettiset energiavarastot

Suprajohtavassa magneettisessa energiavarastossa (engl. *Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES*) sähköenergiaa varastoidaan käämin magneettikenttään. Käämi on tehty suprajohtavasta materiaalista, jonka vuoksi sen resistanssi on tasavirralla lähes nolla. Käämissä kulkeva virta aiheuttaa magneettikentän johtimen ympärille. Magneettikenttään varastoitunut energia E voidaan laskea kaavalla

$$E = \frac{1}{2} LI^2, \quad (2)$$

jossa L on käämin induktanssi ja I on sähkövirran suuruus. Suprajohtavasta magneettisesta energiavarastosta on mahdollista saada suuri teho pienellä vasteajalla ja yli 95 prosentin hyötysuhteella.

Näitä magneettisia varastoja kehitetään, mutta SMES:n haasteena ovat suuret kustannukset ja pieni energiatiheys. Suuret kustannukset muodostuvat jäähdytysjärjestelmästä. Käytössä olevat suprajohteet toimivat vain matalilla lämpötiloilla, minkä vuoksi tarvitaan tehokasta jäähdytystä. Lisäksi käämin magneettikenttä voi olla ympäristölle haitallinen, joten SMES-laitos pitäisi koteloida tai sijoittaa maan alle. Pieni energiatiheys tarkoittaa käytännössä sitä, että tehokas magneettinen energiavarasto vaatii paljon tilaa. [1, s. 10–13.]

2.1.7 Vetyvarasto

Energialähteenä vety on kiinnostava vaihtoehto. Sitä on runsaasti saatavilla, se on energiatehokasta ja vedyn palaessa eli reagoidessa hapen kanssa päästönä syntyy vain vettä. Vety on maailman yleisin alkuaine, mutta sitä esiintyy vain yhdistyneenä muihin aineisiin. Esimerkiksi vesi muodostuu vedestä ja hapesta. Tästä syystä vetyä täytyy tuottaa ennen sen varastointia. Vetyyn perustuvan energiavaraston haasteena ovat vedyn tuotanto ja varastointi.

Nykyään vetyä tuotetaan luonnonkaasun, öljyn tai hiilen avulla, mutta niissä menetelmissä syntyy hiilidioksidia sivutuotteena. Ympäristön kannalta edullisempi vaihtoehto on tuottaa vetyä elektrolyysillä, joka tarkoittaa veden hajottamista vedyksi ja hapeksi sähkövirran avulla. Jos elektrolyysiin käytetty sähkö tuotetaan uusiutuvalla energialla, prosessissa ei synny päästöjä. Prosessiin tarvitaan kuitenkin paljon sähköenergiaa, mikä tulee kalliiksi verrattuna muihin tuotantomenetelmiin.

Vetyä voidaan varastoida kaasuna, nesteenä tai kemiallisesti metallihydrideihin. Paineistettu vetykaasu varastoidaan sylinterin muotoisiin säiliöihin. Paineistetun vetykaasun huonoja puolia ovat varaston painavuus, tilavuus ja vedyn räjähdysherkkyys. Nestemäisen vedyn energiatiheys on suurempi kuin kaasulla, joten se ei tarvitse yhtä suurta varastointitilaa kuin vetykaasu. Vedyn nesteyttäminen vaatii kuitenkin paljon energiaa. Prosessiin tarvitaan energiamäärä, joka vastaa noin kolmasosaa varastoitavan vedyn sisältämästä energiasta.

Vedyn kemiallinen varastointi perustuu metallihydridin ominaisuuteen sitoa vetyä. Kemiallisesti varastoitu vety voidaan vapauttaa lämmön tai katalyysireaktion avulla. Metallihydridit voivat kuitenkin sitoa vetyä suhteellisen pienen prosentin omasta painostaan, mikä tekee varastosta painavan. [1, s. 5–7.]

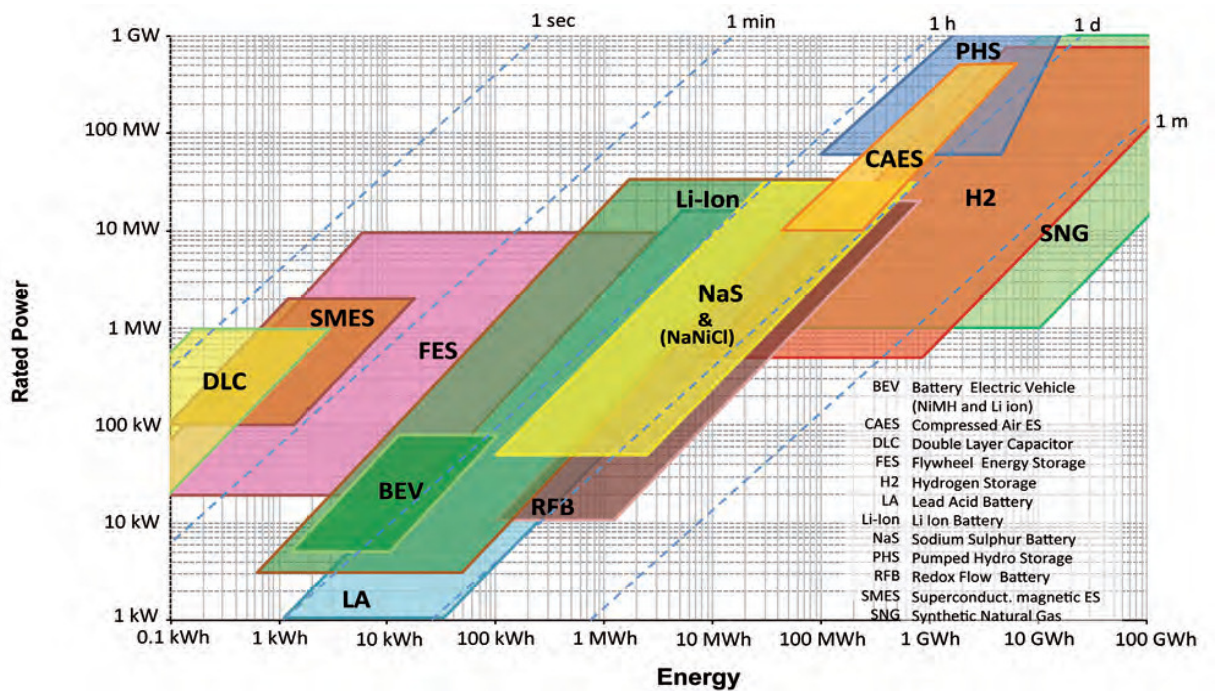
2.2 Varastointimenetelmien vertailu

Kun energiaa muutetaan muodosta toiseen, tavoitteena on tehdä muutos mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella. Hyötysuhde on vain yksi energiavarastojen vertailuominaisuus, muita ominaisuuksia ovat

- kapasiteetti
- nimellisteho
- teho- ja energiatiheys
- purkaus aika
- vaste aika
- varaston tekninen kypsyys
- turvallisuus
- kustannukset
- elinikä.

Nimellisteho tarkoittaa käytännössä varaston lataus- ja purkunopeutta. Varaston purkausajalla tarkoitetaan aikaa, joka kuluu varaston kapasiteetin purkamiseen nimellisteholla. Vaste aika on aika, joka kuluu varastossa olevan energian siirtämiseen kulutukseen. Teho- ja energiatiheys ovat olennaisia, jos varaston koolla on merkitystä. Esimerkiksi kaksi energiavarastoa voivat sisältää saman määrän energiaa, mutta suuremman energiatheyden omaava varasto on fyysisesti pienempi.

Kuvassa 1 (ks. seuraava sivu) on yhteenveto energiavarastojen ominaisuuksista. Kuvassa esitetään tehon suhde kapasiteettiin ja purkaus aikaan. Asteikot ovat logaritmisia. Siniset katkoviivat osoittavat mille aikavälille varaston purkaus aika voi sijoittua. Purkaus aika voi olla siis sekunneista kuukausiin. Suuri kapasiteetti ja pieni nimellisteho tarkoittavat, että varastosta voidaan luovuttaa energiaa pitkään eli purkaus aika on suuri.



Kuva 1. Energiavarojen teho verrattuna kapasiteettiin ja purkaus aikaan (ks. lyhenteet) [11, s. 36]

Kuvassa 1 on otettu huomioon varastointimenetelmien nykytilanne ja tulevaisuuden arvioitu tekninen taso. Kuvan mukaan erilaisten akkujen tai akustojen (LA, BEV, Li-ion ja NaS) varastointikapasiteetti vaihtelee yhdestä kilowattitunnista yhteen gigawattituntiin. Tämä johtuu siitä, että akkuvaramot ovat modulaarisia eli useita akkukokonaisuuksia voidaan kytkeä sarjaan. Muistakin varastotyypeistä voidaan tietysti tehdä erikokoisia, mutta ne ovat enemmän rajoitettuja kuin akut. Nykypäivän teknologialla yksi standardikokoinen kuljetuskontti akkuja vastaa suurin piirtein 0,5 MWh:n kapasiteettia. Litium-ioni -akulle (Li-ion) on kuvassa asetettu maksimissaan 100 MWh:n kapasiteetti. Siihen tarvitaan joko erittäin paljon tilaa tai akkujen kehitystä eli energiatihedden kasvua.

Energiavaramon teho ja kapasiteetti määräävät mihin sovellukseen varastoa voidaan käyttää. Mahdolliset käyttösovellukset jakautuvat sähköverkon eri jännitetasoihin. Taulukossa 1 (ks. seuraava sivu) esitetään varastointitekniikoiden soveltuvuus sähköverkon eri osiin. Taulukossa sj/kj tarkoittaa suurjännite/keskijännite - sähköasemaa, ja pj on pienjänniteverkko. Taulukko havainnollistaa akkuteknologioiden ominaisuuksia. Useimmat akkutyypit sopivat vain pienjänniteverkkoon, mutta litium-ioni- ja natrium-rikki-akuilla on laajempi käyttöalue akkuvaramon rakenteen vuoksi. Esimerkiksi konttiin sijoitettuna akusto vie suhteellisen vähän tilaa ja kestää

kovempiakin sääolosuhteita. Pienemmät akkuvarastot ovat liitettävissä 400 voltin tasoon sähköauton tai kuluttajan oman pientuotantolaitoksen muodossa. Suurikokoiset varastotyypit kuten paineilmavarastot ja vesivarastot ovat luonnollisesti rajoitettuja toimimaan alueilla, jossa on tarpeeksi tilaa ja sopivat olosuhteet. Taulukon 1 tiedot ovat Eurelectricin tekemästä tutkimuksesta [12].

Taulukko 1. Sähkövarastojen soveltuvuus verkon eri jännitetasoihin [12, s. 26].

varastointi- teknologia	varasto- tyyppi	teho- luokka	jännite- taso			
			siirto- verkko	jakelu- verkko		
				sj/kj	kj	pj
sähkökemialliset akut	lyijyakku	5–10 kW				x
	NiCd					x
	NiMh					x
	NiZn					x
	litium-akut	50 kW–2 MW	x	X	x	x
	NaS	> 1 MW	x	X	x	
	ZEBRA			X	x	
virtausakut	PSB				x	x
	VRB	5 kW–10 MW		X	x	x
	ZnBr	25 kW–1 MW		X	x	x
mekaaniset	CAES	10 MW–3 GW	x	X	x	
	vesivoima	10 MW–3 GW	x	X	x	
	vauhtipyörä	< 20 MW	x	X	x	x
sähkö- magneettinen	SMES	< 10 MW	x	X	x	x
sähköstaattinen	superkond.	< 20 MW	x	X	x	x

Taulukossa 1 NiCd, NiMh ja NiZn ovat erilaisia nikkeli-akkuja, ja ZEBRA-akulla tarkoitetaan natrium-metallikloridi -akkuja. ZEBRA-akku on NaS (natrium-rikki) -akun johdannainen, jossa rikki on korvattu nikkelikloridilla (NiCl₂) [11, s. 28]. Virtausakkuja on kolme eri tyyppiä; Polysulfaatti-bromidi (PSB), vanadium-redox (VRB) ja sinkki-bromi (ZnBr) [13, s.20].

2.3 Energian varastoimisen hyödyt

Energian tehokas ja taloudellinen varastoiminen vähentää riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Akkuteknologian jatkuva tutkimus- ja kehitystyö johtanee tulevaisuudessa halvempiin ja tehokkaampiin akkuihin, mikä mahdollisesti lisää sähköautojen määrää. Sähköautot aiheuttavat kuitenkin epäsuorasti päästöjä, jos auton lataamiseen käytetty sähkö on tuotettu fossiilisilla polttoaineilla. Uusiutuvan energian osuus sähköntuotannosta on vielä pieni, mutta sen odotetaan kasvavan lähitulevaisuudessa (ks. 7.2 Tuulivoiman vaikutus sähkövaraston tulevaisuuteen). Energiavarastoilla voidaan parantaa uusiutuvien tuotantotapojen tehokkuutta ja näin ollen nopeuttaa niiden yleistymistä. Päästöjen vähentämisen lisäksi, energiavarasto parantaa sähköverkon ominaisuuksia.

Sähköverkon joustavuudella tarkoitetaan sähköverkon kykyä reagoida nopeasti ja luotettavasti suuriin tuotannon ja kulutuksen muutoksiin. Koska nykyään sähkön varastointi ei ole yleistä, tehotasapainon ylläpitämiseen voidaan käyttää sähkön kysyntäjoustoa ja siirtoyhteyksiä [14, s. 8]. Tulevaisuudessa energian varastoimisella voidaan lisätä sähköverkon joustavuutta, sillä varastointitekniikat kehittyvät ja tarjoavat uusia mahdollisuuksia. Jotta energian varastoinnin potentiaaliset hyödyt saadaan käyttöön, tarvitaan turvallinen, tehokas ja taloudellinen varastoratkaisu.

3 Akkutekniikat

Perinteisen akun toiminta perustuu kemialliseen reaktioon, tarkemmin sanottuna hapettumis- ja pelkistymisreaktioon. Reaktiossa elektroneja vastaanottava aine on hapetin, ja elektroneja luovuttava aine on pelkistin. Akku koostuu useista kennoista, joiden sisällä on kaksi elektrodia, hapetin ja pelkistin. Ne ovat upotettuna johtavaan elektrolyyttinesteeseen, jossa ionit siirtyvät elektrodilta toiselle. Kun varatun akun elektrodeihin eli käytännössä akun napoihin kytketään sähkölaite, elektronit alkavat kulkea laitteen läpi negatiiviselta elektrodilta positiiviselle. Akkua ladattaessa reaktio tapahtuu toisinpäin. [15, s. 4–5.]

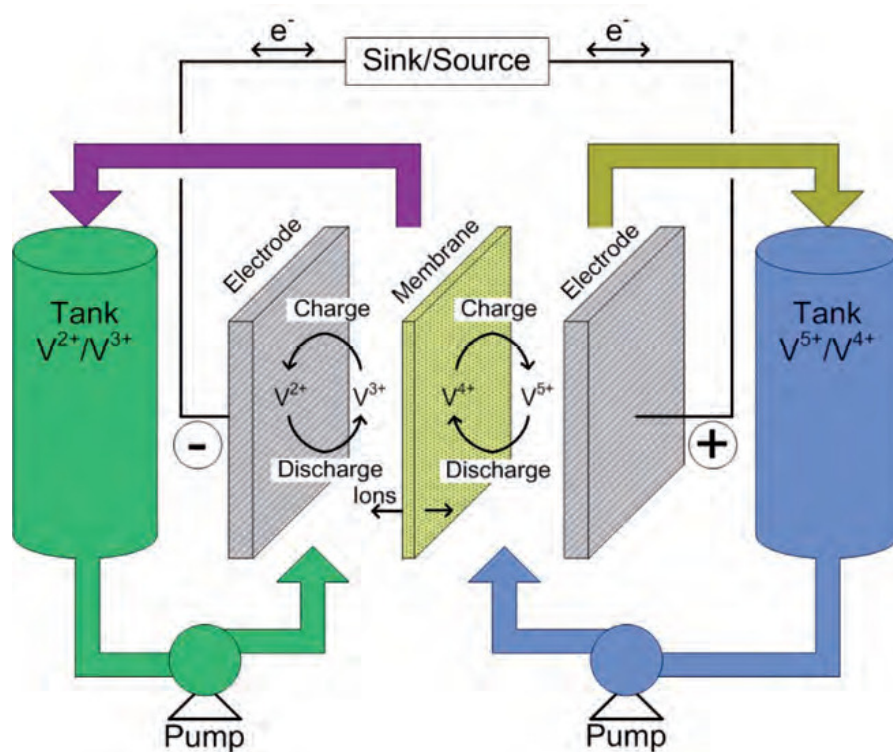
Eri akkuteknologiat eroavat toisistaan pääosin elektrodien materiaalien ja elektrolyyttiaineen mukaan. Mitä enemmän ioneja elektrodi voi varata, sitä enemmän energiaa akkuun voidaan varastoida. Ionien siirtymisnopeus elektrodissa riippuu elektrolyyttiaineesta ja elektrodin materiaalista. Toisin sanoen elektrodin materiaali vaikuttaa myös akun lataus- ja purkausnopeuteen.

Akkuteknologiat ovat yleensä nimetty käytettävien elektrodimateriaalien tai akun toimintaperiaatteen mukaan. Eri elektrodipareja tai akkutyypppejä ovat, muuan muassa

- litium-ioni
- litium-polymeeri
- natrium-rikki
- alumiini-rikki
- lyijyakku
- nikkeli-kadmium
- metalli-ilma
- nikkeli-metallihybridi
- virtausakut.

Perinteisissä akuissa sähkövaraus muodostuu akun kennossa oleviin elektrodeihin, joiden välissä on sähköä johtava elektrolyytti. Virtausakussa energia varastoidaan metalli-ioneihin, jotka ovat liuenneena elektrolyyttinesteeseen. Virtausakut voidaan jaotella ns. redox- ja hybridivirtausakkuihin. [14, s. 90.]

Kuvassa 2 (ks. seuraava sivu) esitetään vanadium-redox-akun toimintaperiaate. Virtausakuissa elektrolyttineste kierrätetään pumppujen avulla elektrodien ja sähkökemiallisen kalvon välistä sekä varastoidaan ulkoisiin säiliöihin. Negatiivisen elektrodin kautta virtaavaa elektrolyyttiä kutsutaan anolyytiksi, ja positiivisen elektrodin puolelta virtaa katolyytti. Kun energiaa tarvitaan, molemmat ioneja sisältävät elektrolyytit pumpataan elektrodien ja välikalvon välistä, minkä aikana ne vaihtavat sähköistä varausta. Varauksen vaihtuminen aiheuttaa sähkövirran elektrodissa. [11, s. 28.]



Kuva 2. Vanadium-redox -akun toimintaperiaate [11, s. 29]

Kuvassa 2 vihreä säiliö kuvaa anolyyttiä ja sininen katolyyttiä. Anolyytin ja katolyytin virratessa elektrodin ja välikalvon välistä ne vaihtavat varausta, mikä aiheuttaa sähkövirran.

Hybridivirtausakussa on yhdistetty tavallisen akun ja virtausakun teknologiaa. Energiaa varastoidaan sekä sähkökemiallisiin kennoihin, että ulkoisiin tankkeihin. Sinkki-bromi-akku (ZnBr) on yksi hybridivirtausakku, jota on kehitetty jakeluverkon ja pienjänniteverkon sovelluksiin. [11, s. 30.]

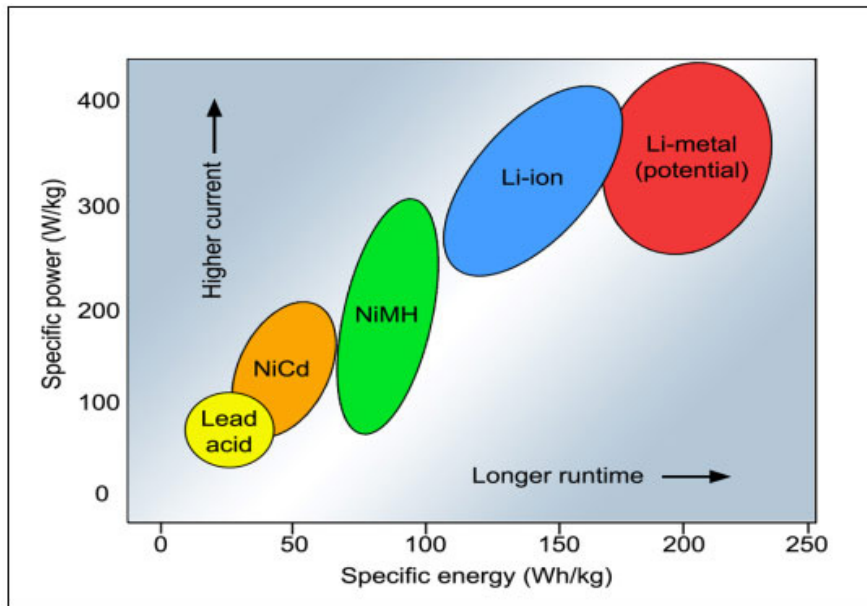
Litium-akku on yleisnimitys akulle, jossa litium-ionit virtaavat elektrolyytissä anodilta katodille akkua purettaessa. Litium-akkujen ominaisuudet eroavat valitun katodimateriaalin mukaan. Katodimateriaali vaikuttaa muun muassa kennon nimellisjännitteeseen, sykliseen elinikään, teho- ja energiatihyyteen sekä turvallisuuteen. Litium on alkuaine, joka reagoi voimakkaasti veden kanssa, joten litium-akun elektrolyytti ei saa päästä kosketuksiin veden kanssa. Yleisimmin käytössä olevia litium-akun tyyppisiä, tai toisin sanoen elektrodimateriaaleja ovat litium-koboltti, litium-mangaani, litium-fosfaatti ja litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi (NMC). [16.]

3.1 Akkuteknologioiden vertailu

Akkuvalmistajat voivat optimoida akulle haluttuja ominaisuuksia. Yhtä parasta akkuteknologiaa on mahdotonta valita, koska käyttösovellus määrittelee oikeat kriteerit juuri kyseiseen käyttöön. Akkuteknologioita voidaan vertailla useiden eri ominaisuuksien kannalta, joita ovat ainakin

- tehotiheys (W/kg)
- energiatiheys (Wh/kg)
- elinikä (syklinen ja kokonaisikä)
- lataus- ja purkausnopeus
- huollon tarve
- turvallisuus
- hinta (esim. €/kWh).

Kuvassa 3 (ks. seuraava sivu) vertaillaan lyijy-, nikkeli- ja litium-akkujen varauskykyä. Kuvaajassa vaaka-akselilla on energiatiheys ja pystyakselilla tehotiheys. Mitä ylemmäs akkuteknologia sijoittuu kuvaajassa, sitä suurempia lataus- ja purkausvirtoja se voi käyttää. Vaaka-akselin oikeaan päähän sijoittuvilla teknologioilla on suurempi energiatiheys eli pidempi toiminta-aika. Kuvaajan mukaan tehokkain akku näistä tyypeistä on litium-metalli-akku. Tämä akkutyypin esiteltiin jo 80-luvulla, mutta kehittäminen jäi puolittiehen epävakaa anodimateriaalin takia. Potentiaalisten ominaisuuksien innoittamana tutkijat kuitenkin ovat alkaneet kehittää litium-metalli-akkua uudelleen. [17.]



Kuva 3. Akkuteknologioiden teho- ja energiatiheyksiä [17]

Kuvassa 3 litium-ioni-akun korkein energiatiheys on alle 200 Wh/kg, joka pitää paikkansa nykyään kaupallisissa akuissa. Kehitystä tapahtuu kuitenkin koko ajan.

3.2 Lupaavia tulevaisuuden akkuteknologioita

Akkuja kehitetään, jotta ominaisuuksia saadaan parannettua ja kustannuksia pienennettyä. Akun varauskyky eli kapasiteetti riippuu anodin ja katodin materiaaleista, joilla on tietty sähkön varauskyky. Eri vaihtoehtoja anodin ja katodin materiaaleiksi tutkitaan jatkuvasti.

Automotive Engineer -lehden (tammi-helmikuu 2013) artikkelissa merkittävät laitevalmistajat ja toimittajat antoivat oman arvionsa akkuteknologioiden kehitymisestä. Allan Paterson työskentelee Axionilla sähkökemian insinöörinä. Patersonin mukaan vuonna 2025 markkinoilla on todennäköisesti kolme erilaista akkuteknologiaa. Ensimmäinen perustuisi nykyään edistyneinä pidettyjen akkujen anodi- ja katodimateriaalien kehitykseen. Toinen 2025 käytettävä teknologia syntyisi lupaavien akkuteknologioiden nykyisten ongelmien ratkaisemisen kautta. Esimerkkinä Paterson mainitsee litium-rikki-akun. Kolmas akkuteknologia olisi sellainen, joka nykyään on vain tutkimusasteella, esimerkiksi litium-happi-akku. Patersonin mukaan edellä mainittujen

akkuteknologioiden eteen tehdään maailmanlaajuisesti tutkimustyötä, jotta akuille saadaan kaivattua tehokkuutta. [18, s. 33–35]

3.2.1 Litiumioni-akun tulevaisuuden näkymiä

Korealaiset tutkijat ovat kehittäneet uuden anodimateriaalin litium-akulle. Germanium-nanoputkista valmistetun anodin kerrotaan kestävän kaksi kertaa enemmän latauskertoja verrattuna nykyään käytettyyn piianodiin. Lisäksi uudella anodimateriaalilla on viisinkertainen lataus- ja purkausnopeus piianodeihin verrattuna. Haittapuolena uudessa materiaalissa tutkijat mainitsevat germaniumin kalliin hinnan, mutta arvioivat sen laskevan mikäli suuret akkuvalmistajat ottavat materiaalin osaksi tuotteitaan. [19.]

Kaliforniassa sijaitseva Envia Systems -yritys on edelläkävijä litium-akun kehityksessä. Envia Systems kehittää akkuja erityisesti sähköautoihin. Vuoden 2012 alussa yritys rikkoi maailmanennätyksen akullaan, jonka energiatiheudeksi mitattiin noin 400 Wh/kg. Nykyään käytetyillä akuilla energiatiheys on Envia Systemsin mukaan korkeintaan 180 Wh/kg. [20.]

Litium-akun turvallisuuteen ja energiatiheuteen on luvassa kehitystä. Nykyään joidenkin litium-akkujen sisällä oleva elektrolyyttiaine on palavaa nestettä, joka heikentää akun turvallisuutta. Tulevaisuudessa elektrolyytinä voi toimia nanoteknologiaan perustuva materiaali (Li_3PS_4), joka on kiinteää ja vähemmän paloherkkää. Uuden materiaalin huokoinen nanorakenne kasvattaa sen sähkönjohtavuutta. Lisäksi nanorakenteen kerrotaan viisinkertaistavan litium-akun energiatheyden eli kyvyn sitoa energiaa. [21.]

3.2.2 Vanadium-akun kehittäminen

Virtaustekniikkaan perustuvan vanadium-akun kapasiteettiä on saatu kehitettyä 70 % aikaisempaa tehokkaammaksi. Virtausakussa kierrätetään kahta erilaista vanadiumliuosta, jotka toimivat sähköä johtavana elektrolyttinesteenä. Pacific Northwest National Laboratory -tutkimuskeskuksen tutkijat paransivat vanadium-akun ominaisuuksia muokkaamalla akun elektrolyytin koostumusta. Lisäksi uuden elektrolyyttiliuoksen myötä akku pystyy tulevaisuudessa toimimaan laajemmalla lämpötila-alueella. Nykyään teknologian haasteena on ollut akun kustannukset, mitkä

johtuvat akun heikosta kyvystä toimia eri lämpötiloissa. Kustannukset nousevat, jos tarvitaan erillisiä jäähdytys- tai lämmitysjärjestelmiä. [22.]

4 Akkupohjainen sähkövarasto

Tässä työssä keskitytään tarkemmin akkuihin perustuvaan sähkövarastoon ja sen käyttösovelluksiin. Akkuvarastolla saattaa olla tulevaisuudessa useita käyttösovelluksia, sillä akkupohjaisen sähkövaraston rakenne mahdollistaa laajan käyttöalueen sähköverkon eri osissa. Suur- ja keskijänniteverkkoon kytketyt akkukokonaisuudet sisältävät paljon energiaa, jolloin täytyy huomioida myös turvallisuus. Tässä luvussa käsitellään akkupohjaisen sähkövaraston rakennetta ja turvallisuusnäkökulmia.

4.1 Akkupohjaisen sähkövaraston rakenne

Akkuihin perustuva sähkövarasto voi olla yksi kaappi, joka sisältää muun muassa akkumoduulit, akkuhallintayksikön ja tasasuuntaajan. Silloin puhutaan kymmenien kilowattien tehoisesta varastosta, jolla on muutaman kymmenen kWh:n kapasiteetti riippuen käytetystä akkuteknologiasta. Suurempia teholuokkia tarvittaessa kytketään useita kaappeja sarjaan. Akkumoduuleja sisältäviä kaappeja voidaan sijoittaa konttiin, josta saadaan n. 1–2 megawatin teho ja n. 500 kWh:n kapasiteetti. [23, s. 5.]

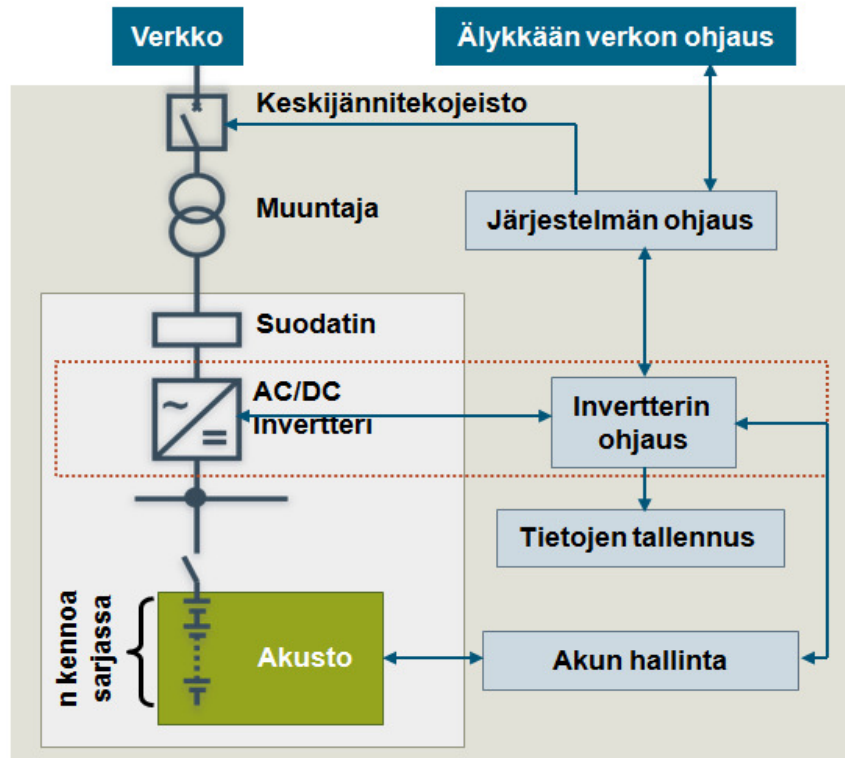
Yhdysvalloissa toimiva yritys, A123 Systems, kehittää ja valmistaa sähkön varastointijärjestelmiä. Yrityksen mukaan on mahdollista rakentaa 500 MW:n tehoinen varastointijärjestelmä, joka koostuu kymmenistä akkukonteista. Tämän kokoluokan akkuvarastoa ei tiettävästi ole testattu käytännössä, mutta ainakin Pohjois-Chilessä ja Länsi-Virginiassa on otettu käyttöön 12–32 megawatin tehoiset varastot. Chilessä sijaitsevat kaksi varastoa ovat kooltaan 12 MW/3 MWh ja 20 MW/5 MWh. Ne toimivat ns. pyörivänä reservinä (engl. *Spinning Reserve*). Pyörivällä reservillä tarkoitetaan taajuuden muutoksista automaattisesti aktivoituvia pätötehoreservejä taajuuden vakauttamiseksi. Länsi-Virginiassa sijaitsevaa varastoa käytetään uusiutuvien tuotantotapojen tuotannon tasoittamiseen. Kuvassa 4 (ks. seuraava sivu) on edellä

mainittu Chilen sähkövarasto, joka on ollut käytössä vuodesta 2009 lähtien. [24; 12, s. 14.]



Kuva 4. Chilessä oleva 3 MWh:n litiumioni-akusto [11, s. 44]

Akkukäyttöisen sähkövaraston etuja ovat sen modulaarinen rakenne ja nopea vasteaika, minkä vuoksi sillä on useita eri käyttömahdollisuuksia. Modulaarinen rakenne mahdollistaa sähköverkkoon liittymisen eri jännitetasoissa, ja nopeaa vasteaikaa tarvitaan esimerkiksi verkon taajuudensäädössä. Kuvassa 5 (ks. seuraava sivu) havainnollistetaan sähkövaraston liittämistä sähköverkkoon ja muihin laitteisiin.



Kuva 5. Sähkövaraston liittäminen verkkoon [23, s. 5]

Kuvassa 5 akusto on liitetty keskijänniteverkkoon. Ennen verkkoa tarvitaan keskijännitekojeisto, muuntaja ja invertteri. Invertterillä vaihtosähkö tasasuunnataan, kun akkuja ladataan. Kun akustosta syötetään tehoa verkkoon päin, tasasähkö vaihtosuunnataan. Invertterin syöttämä vaihtojännite ei ole puhdasta sinimuotoista jännitettä, minkä takia käytetään suodatinta. Suodatin vähentää siniaallon tasasähköpitoisuutta eli parantaa sähkön laatua.

Akun hallintajärjestelmä pitää akkujen varauksen sopivalla tasolla ja kommunikoi invertterin kanssa. Älykkäällä sähköverkolla (engl. *Smart Grid*) tarkoitetaan verkkoa, jossa sähköteho ja informaatio kulkevat verkosta kulutuspiisteeseen ja toisinpäin. Tähän kaksisuuntaiseen sähkön ja tiedon liikenteeseen tarvitaan älykkäitä tiedonsiirtojärjestelmiä ja mittareita. Suomessa uusien etäluettavien energiamittareiden asennus on edennyt hyvin, ja verkkoyhtiöiden on asennettava 80 prosentille asiakkaistaan uudet mittarit vuoden 2013 loppuun mennessä. [25; 26.]

4.2 Akkutekniikan turvallisuus

Turvallinen toiminta on tärkein edellytys akkupohjaisen energiavaraston käytölle. Akustoille on asetettu tiettyjä turvallisuusvaatimuksia akkutyypin ja käyttösovellusten perusteella. Esimerkiksi sähköautojen akuille on laadittu eri standardit kuin aurinkosähköjärjestelmiin tarkoitetuille akuille. Yleisesti akusto täytyy suojata kuten muutkin sähkölaitteet (esim. suojaus sähköiskulta), mutta lisäksi akulla on tiettyjä ominaisuuksia, jotka täytyy ottaa huomioon.

Standardi SFS-EN 50272-2 koskee paikallisakkuja ja -akkuasennuksia, joiden suurin nimellisjännite on 1500 V (DC). Paikallisakulla tarkoitetaan akkua, joka on tarkoitettu kiinteään käyttöön ja jota ei siirrellä akun elinaikana. Kyseinen standardi käsittelee lyijy- ja nikkeli-kadmium -akkuja. Niissä akkutyypeissä sähköä aiheuttaman vaaran lisäksi akuston turvallisuusriskit muodostuvat kaasunkehityksestä ja elektrolyytistä. Lyijy- ja nikkeli - kadmium -akuissa syntyvä kaasu on vetyä ja happea. Kaasun muodostus voi aiheuttaa räjähdysvaaran, minkä vuoksi standardissa on määritelty ilmanvaihtovaatimukset akustotiloille.

Akun ylikuumeneminen on vaarallista ja voi johtua liian suuresta purkausnopeudesta, ylikalauksesta tai oikosulusta (SFS-EN 50272-2). Oikosulkuvirta kasvaa akussa erittäin suureksi pienen sisäisen resistanssin takia, joten oikosulku voi aiheuttaa suuren kuumuuden lisäksi jopa räjähdysten. Oikosulkusuojaus on olennainen osa akun turvallisuutta. Yksi tapa toteuttaa akuston oikosulkusuojaus on suojata jokainen akku erikseen sulakkeella. Vian tapahtuessa vain vikaantunut yksikkö poistuu käytöstä, ja ehjillä akuilla voidaan jatkaa toimintaa. Toinen tapa on jakaa akusto ryhmiin ja suojata jokainen akkuryhmä sulakkeilla.

Tulevaisuudessa lyijyakut tekevät luultavasti tilaa uusille akkuteknologioille. Lyijyakut ovat hyvin yleisesti käytössä nykyään esimerkiksi UPS-käytöissä, mutta sähköautoja varten kehitetään turvallisempia ja tehokkaampia akkuja. Tämä kehitys voi hyvin johtaa akkuteknologiaan, jota voidaan hyödyntää myös sähköverkkosovelluksissa.

5 Sähkövaraston käyttösovellukset tulevaisuuden sähköverkossa

Käyttösovellus määrittelee mitä ominaisuuksia sähkövarastolta tarvitaan, ja mikä varastotyyppi sopii kyseiseen tarkoitukseen. Sähkövarastoja voidaan käyttää energian tuotannossa, sähkön siirrossa, teollisuudessa ja ajoneuvoissa. Seuraavaksi tarkastellaan sähkövaraston mahdollisia käyttösovelluksia tulevaisuudessa.

5.1 Uusiutuvan energian tuotannon vakauttaminen

Tuuli- ja aurinkoenergialla tuotettu sähköteho on riippuvainen sääolosuhteista. Ilman sähkön varastointia tuulivoimalla tuotettua energiaa ei voida kokonaisuudessaan hyödyntää. Sähköverkolla on tietty kapasiteetti ja taajuus, joka on pidettävä mahdollisimman vakiona. Tuotannon ylittäessä kulutuksen taajuus pyrkii kasvamaan, ja sähköverkon siirtokapasiteetti voi täytyä. Silloin tuulivoimaloiden tuotantoa joudutaan rajoittamaan, ja uusiutuvaa energiaa menee käytännössä hukkaan. Sähkövaraston avulla tämä ylimääräinen energia voidaan ottaa talteen ja käyttää silloin, kun kulutus taas kasvaa.

Tuulivoiman tuotannon haasteena on tuulen voimakkuuden vaihtelu. Vaihtelu voi olla suurta päivittäin ja tunneittain, minkä lisäksi se on satunnaista. Koska tuulen voimakkuutta ei voida tarkasti ennustaa etukäteen, tuulivoimaa ei voida pitää tasaisena tuotantomuotona. Siksi tuulivoimalat tarvitsevat säätövoimaa, joka tarvittaessa kytketään verkkoon korvaamaan tuulivoimaa. Energiateollisuus ry:n ja Fingridin tekemän tutkimuksen mukaan tuotannon ja kulutuksen tasoittamiseen sopivimpia akkuteknologioita ovat natrium-rikki- ja litium-akku. Nämä akkutyypit sopivat ominaisuuksiltaan aurinko- ja tuulivoiman tuotannon tasoittamiseen. [14, s. 20, 90.]

5.2 Kulutuksen ja tuotannon tasoittaminen

Sähköverkon on oltava aina tasapainossa kulutuksen ja tuotannon suhteen. Jos kulutus on suurempi kuin tuotanto, taajuus pyrkii laskemaan, ja tuotannon ylittäessä kulutuksen taajuus nousee. Ilmiö on verrattavissa moottorin pyörimisnopeuteen. Jos moottorille kytketään suuri kuorma, sen pyörimisnopeus laskee hetkellisesti. Sähkön varastointi voisi olla yksi keino tuotannon ja kulutuksen tasapainon ylläpitämiseen.

Sähkön kulutuksen vaihtelua voidaan tarkastella pitkällä tai lyhyellä aikavälillä. Pitkällä aikavälillä kulutus vaihtelee vuodenajan mukaan, sillä Suomen olosuhteissa lämmitystarve aiheuttaa suurta vaihtelua kulutuksessa. Sähkölämmitys on erittäin yleinen lämmönlähde, ja se näkyy etenkin kylminä talvikuukausina kulutuksen kasvuna. Lyhyemmällä aikavälillä (viikon ja vuorokauden sisällä) kulutukseen vaikuttavat merkittävästi teollisuus, toimistojen työajat, katuvalaistus ja arjen rutiinit, kuten ruoanlaittoajat ja varaava sähkölämmitys. Sähkön tuotannon täytyy vastata kulutusta, mutta tuotantokin voi joskus muuttua yllättävästi verkon vikaantuessa tai tuotantolaitoksen pudotessa verkosta. [14, s. 8.]

Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpitämiseksi tarvitaan erilaisia tuotantomuotoja. Tuotannon pitää pystyä reagoimaan kulutuksen muutoksiin, joten tarvitaan voimalaitoksia, joilla on riittävän nopeat säätöominaisuudet. Vesivoimalla on sopivat ominaisuudet säätöön ja sitä käytetäänkin eniten päivittäisen kulutuksen ja tuotannon tasoittamisessa. [14, s. 20.]

Vesivoimaloissa energiaa menee kuitenkin hukkaan ohijuoksutuksissa. Jos runsaat sateet täyttävät vesialtaat, eikä voimala voi nostaa sähkön tuotantoa, vettä joudutaan juoksuttamaan tulvaluukuista turbiinien ohi. Esimerkiksi Kemijoen voimalaitokset ohijuoksuttivat vuonna 2012 lokakuuhun mennessä 500 GWh:n edestä vettä. Tämä energiamäärä vastaa yli sadan tuhannen kotitalouden vuosittaista sähkön kulutusta. Luonnollisesti voimalaitoksilla on intressit varastoida ohijuoksutettu sähkö, mutta nykyään ei ole vielä riittävän tehokasta ja taloudellista sähkövarastoa tähän tarkoitukseen. [27.]

5.3 Huipputehon välttäminen

Teollisuudessa on mahdollista tasoittaa kulutushuippuja sähkövaraston avulla. Sähkön hinta teollisuudessa muodostuu tehon perusteella siten, että lasketun keskitehon ylittyessä maksetaan kalliimpaa huipputehoa. Kun laitoksessa tarvitaan keskimääräistä suurempaa hetkittäistä tehoa, se voitaisiin syöttää tehtaan omasta sähkövarastosta, jota on ladattu pienen kulutuksen aikaan. Tämä tasoittaisi laitoksen kulutusta, ja kalliit tehopiikit voitaisiin välttää.

Toisaalta sähkövarastoon investoiminen voi tulla kalliiksi verrattuna siihen, että tehdasta kuormittavien laitteiden käyttöä vuorotellaan, jolloin sopimuksessa olevaa huipputehon rajaa ei ylitetä. Jos vuorottelu ei ole mahdollista, sähkövarasto voi olla järkevä vaihtoehto. The Boston Consulting Groupin tekemän tutkimuksen mukaan eri litiumioni-akustoilla toteutettu huipputehon muokkaus on kannattavaa varsinkin, jos samalla sähkövarastolla on muitakin käyttösovelluksia. [4, s. 11–12.]

5.4 Verkkotaajuuden säätö

Sähkövarastoja käytetään nykyään ainakin ns. pyörivänä reservinä, joka luetaan taajuuden vakautusreserviin (ks. 4.1 Akkupohjaisen sähkövaraston rakenne). Sähkön varastointitekniologioista sopivimpia nopeaan taajuudensäätöön ovat vauhtipyörät ja erilaiset akut. Taajuudensäätöön osallistuvan sähkövaraston vasteaika on oltava riittävän lyhyt, toisin sanoen varastossa oleva energia täytyy saada sähköverkkoon ilman suurta viivettä.

Suomessa sähköverkon nimellistaajuus on 50 Hz. Pohjoismaissa taajuuden sallitaan vaihtelevan 49,9 Hz:n ja 50,1 Hz:n välillä. Verkkotaajuuden ylläpito on kantaverkkoyhtiön vastuulla. Ylläpito toteutetaan järjestelmäreserveillä ja säätösähkömarkkinoiden avulla. Järjestelmäreservit jaetaan käyttötarkoituksen mukaan kolmeen eri tyyppiin, jotka ovat taajuuden vakautusreservit, palautusreservit ja korvaavat reservit. Vakautusreservit ovat käytettävissä korkeintaan kolmen minuutin viiveellä, ja palautusreservit 15 minuutin aikana. Korvaavat reservit otetaan käyttöön, jos muut reservityypit ovat jo käytössä. [14, s. 11, 14.]

Jos voimalaitoksella tai sähkövarastolla on mahdollisuus osallistua taajuudensäätöön, se voi solmia sopimuksen kantaverkkoyhtiön kanssa taajuudensäätöpalvelusta. Kantaverkkoyhtiö Fingrid maksaa voimalaitokselle korvausta siitä, että voimalaitos pitää sovitun suuruista reserviä taajuuden vakauttamiseksi. Voimalaitos voi omalla kapasiteetillaan osallistua taajuuden ylläpitoon joko vuosi- ja/tai tuntimarkkinoiden kautta. Vuosimarkkinoille osallistutaan avoimen tarjouskilpailun kautta, ja Fingridin kanssa tehtävän vuosisopimuksen perusteella. Tuntimarkkinat ovat vuorokauden sisäiseen täydentävään taajuudensäätöön, ja tuntimarkkinoille osallistuvan ei tarvitse tehdä vuosisopimusta (erillinen sopimus).

Helsingin Kalasataman uudelle asuinalueelle on suunnitteilla tutkimushanke, jossa sähkövarastoa käytetään taajuudensäätöön, loistehon kompensointiin, huipputehon välttämiseen sekä varmennettuun sähkönsyöttöön. Teholtaan luultavasti 1–2 MW:n kokoinen akkuvarasto tulee osaksi liikekeskuksen rengasverkkoa. Kalasataman sähkövarasto-projektin tavoitteina on testata sähkövaraston toiminnallisuutta ja kannattavuutta, sekä saada käytännön kokemusta. Edellä mainitut tavoitteet ovat erittäin tärkeitä energiavarastojen yleistymisen kannalta. [28.]

5.5 Sähkön laadun parantaminen

Sähkön laadulla voidaan tarkoittaa siirrettävän sähkön fyysisiä ominaisuuksia, sähkön toimitusvarmuutta, eri laitteiden suojausta, yhteensopivuutta tai häiriöiden sietokykyä. Sähkön ominaisuuksiin kuuluvat jännitteen suuruus, sinimuotoisuus, taajuus, yliaaltopitoisuus ja vaihejännitteiden välinen vaihe-ero, joka aiheuttaa loistehoa. Toimitusvarmuus tarkoittaa mahdollisimman keskeytymätöntä sähkönjakelua. Sähköverkon haltijalla on sähkömarkkinalaissa (386/1995, 9 §, 1. mom.) säädetty verkon kehittämisvelvollisuus, jonka tarkoitus on muun muassa turvata asiakkaalle riittävän hyvänlaatuinen sähkönsaanti. Myös sähkölaitteiden täytyy kestää sähkön laadun vaihtelut, ja toisaalta laitteet eivät saa merkittävästi heikentää sähkön laatua verkossa.

Sähkövarastolla on mahdollista parantaa sähkön laatua tasoittamalla jännitevaihteluita, osallistumalla taajuudensäätöön ja toimimalla varavoimalana. Sähköverkon jännitetasoa säädetään loistehon avulla. Verkon jännite nousee loistehon kasvaessa ja

laskee, kun loistehoa kompensoidaan. Nykyään loistehoa kompensoidaan yleensä kondensaattoreilla ja kuristimilla. Myös akkuvarastolla voidaan kompensoida loistehoa, ja jännitteen laskiessa alle nimellisarvon varastosta voidaan syöttää tehoa verkkoon. Tällä tavalla voidaan tasoittaa verkon jännitevaihteluita. [29.]

5.6 Varavoima sairaalaympäristössä

Yleisesti varavoimalan ominaisuudet riippuvat käyttökohteesta. Mitä tärkeämpää katkeamaton sähkönsyöttö on, sitä nopeammin ja luotettavammin varavoimalan täytyy reagoida ja toimia.

Yhteiskunnalle tärkeiden toimintojen varmistamiseksi sähköjakelun tulee olla keskeytymätöntä. Sairaaloissa sähköverkon ollessa syystä tai toisesta poissa käytöstä sähkö tuotetaan diesel-käyttöisellä varavoimalalla. Diesel-generaattorilla on kuitenkin oma käynnistysaikansa, joka on sairaalaympäristössä korkeintaan 15 sekuntia. Ennen kuin diesel-generaattori käynnistyy, sähkö tuotetaan UPS-laitteistolla (engl. *Uninterruptible Power Supply*). UPS on akusto, jota ladataan verkon toimiessa normaalisti. Verkkojännitteen katketessa akusto alkaa automaattisesti syöttää sähköä tärkeille laitteille. UPS:n mitoitukselta kerrotaan myöhemmin (ks. 6.1 Akuston mitoitus sairaalan UPS-käyttöön).

Sairaalan diesel-generaattorin korvaaminen pelkästään akustolla on kuitenkin vielä kaukana todellisuudesta, sillä haasteina ovat akkujen riittämätön energiatiheys (kapasiteetti) ja korkeat kustannukset. Sairaalassa on kohteita, joissa on 48 tunnin varautumistarve. Jos oletetaan varavoimalan tehoksi 1 MW ja varautumistarpeeksi 48 h niin kapasiteetiksi saadaan siten 48 MWh. Nykyään standardikokoiseen konttiin rakennetusta akkuvarastosta saadaan 1 MW:n suuruisen teho noin puolen tunnin ajan. Lisäksi sairaaloissa käytetään toimivaksi todettua ja erittäin luotettavaa teknologiaa, joten akkupohjainen sähkövarasto ei korvaa ainakaan kokonaisuudessaan sairaalan diesel-varavoimalaa lähitulevaisuudessa. [30.]

5.7 Verkon laajentamisen välttäminen

Siirto- tai jakeluverkon laajentaminen voi tulla tarpeelliseksi, kun verkon kuormitus kasvaa, eli sähköverkon siirtokapasiteetti tulee liian pieneksi tarvittavan sähkötehon siirtämiseen. Verkon laajentamisen välttäminen (engl. *Transmission and Distribution (T&D) Deferral*) on yksi sähkövaraston sovellus, jossa periaatteena on sijoittaa sähkövarasto lähelle kulutuspistettä. Vähäisen kulutuksen aikana varastoitua energiaa voidaan syöttää varastosta kuormitushuippujen aikana, jolloin sähköverkossa siirrettyä tehoa ei tarvitse kasvattaa. Sähkövaraston toimiessa sekä kuormana, että generaattorina voidaan välttää sähköverkon kapasiteetin ylitys ja uusien sähkölinjojen investointikustannukset.

Sähkövarasto voisi olla hyvin toimiva ratkaisu verkon laajentamisen välttämiseksi ainakin silloin, jos verkon kuormitushuiput osuvat usein samalle ajankohdalle. Sähkövarastoon investoiminen uusien sähkölinjojen sijaan voi olla kannattavaa, jos sähkövarastolla on muitakin käyttösovelluksia kuten taajuudensäätöpalvelu ja sähkönlaadun parantaminen. [4, s. 11.]

5.8 Sähkövarasto saarekekäytössä

Saarekeverkolla tarkoitetaan sähköverkkoa, joka toimii itsenäisenä kokonaisuutena erillään valtakunnan verkosta. Saarekeverkon sähkö tuotetaan joko uusiutuvilla tuotantotavoilla, diesel-generaattorilla tai näiden yhdistelmällä. Sähkövarasto voi toimia saarekeverkossa tuotannon tukena. Tuuli- tai aurinkosähkön tuotanto vaihtelee sääolosuhteiden mukaan (ks. 5.1 Uusiutuvan energian tuotannon vakauttaminen). Vakaan tuotannon merkitys korostuu saarekeverkossa, sillä kuormituksen vaihtelut vaikuttavat enemmän pieneen verkkoon kuin kantaverkkoon. [31.]

Hyvä käytännön esimerkki saarekekäytöstä on Venezuelan rannikolla sijaitsevan Bonairen saaren sähköverkko. Saarella asuu noin 14 000 asukasta, ja saaren sähköverkon huippukuormitusta vastaava teho on 12 MW. Vuonna 2004 Bonairen ainoa voimalaitos paloi maan tasalle, minkä jälkeen paikallinen hallitus päätti investoida

uusiutuvaan energiaan. Uusi voimajärjestelmä valmistui 2010, ja se koostuu 14 MW:sta diesel-varavoimaa sekä 11 MW:sta tuulivoimaa, jota tukee 3 MW:n nikkeliakusto. Akustolla tasoitetaan tuulivoiman vaihteluita ja verkkotaajuutta. Akkujen toimittajan eli SAFT:n mukaan saaren verkkotaajuuden laskiessa akustosta saadaan 3 MW:n teho yli kahden minuutin ajan. Akuston kapasiteetti on 845 kWh, ja se mahtuu kolmeen standardikokoiseen kuljetuskonttiin. [32, s. 33.]

5.9 Sähköautot

Yksi hajautetun energiavaraston tulevaisuudenkuva on sähköautojen akkujen käyttö energiavarastona. Kansainvälisesti tästä sovelluksesta käytetään termiä V2G (engl. *Vehicle "to" Grid*). Jos sähköautoja on tarpeeksi paljon, olisi teoriassa mahdollista käyttää verkkoon kytkettyjä autoja sähkövarastona. Jokaisesta latauspisteessä olevasta autosta voitaisiin älykkäiden mittareiden ja ohjausjärjestelmien avulla siirtää tehoa verkkoon. Tämä tulisi tietenkin tehdä niin, ettei auton akku ole purettu tyhjiin, kun sillä ollaan lähdössä liikenteeseen. Siksi autojen määrän tulisi olla riittävän suuri, jotta autojen muodostamaa kapasiteettia voitaisiin hyödyntää siten, ettei yksittäistä autoa kuormiteta liikaa.

Tampereen verkostomessuilla esiteltiin tammikuussa 2013 valtakunnallista latausoperaattori -hanketta. Hankkeen tavoitteena on perustaa valtakunnallinen latausoperaattori, joka vastaa sähköautojen lataukseen liittyvistä palveluista. Sähköautoja on vielä hyvin vähän Suomessa, mutta määrän odotetaan kuitenkin kasvavan huomattavasti seuraavan 20 vuoden aikana. Euroopan Unioni on asettanut tavoitteet liikenteen päästöjen vähentämiseksi. Vuoteen 2050 mennessä koko liikenteen päästöt tulisi olla 60 % pienemmät verrattuna vuoden 1990 lukuihin. Ajoneuvoteknologian osuus on puolet kyseisestä päästövähennyksestä. [33.]

Sähköautojen käyttö energiavarastona lienee mahdollista joskus tulevaisuudessa, mutta muut varastointimenetelmät tulevat Suomessakin todennäköisesti yleistymään ennen sähköautoja. Sähköautojen määrän tulee olla riittävä, ja autoille tarvitaan monipuolinen latausjärjestelmä, josta ei tiettävästi ole käytännön kokemuksia. Vaikka sähköautojen määrä todennäköisesti kasvaa lähivuosina, latausjärjestelmän kehittäminen kaikille osapuolille toimivaksi on haasteellista ja aikaa vievää.

5.10 Raideliikenne

Sähkövaraston käyttö raideliikenteessä perustuu jarrutusenergian hyödyntämiseen. Junien jarrutusenergia voidaan syöttää asemalla sijaitsevaan akkuvarastoon, junassa olevaan varastoon tai suoraan ajolinjoihin. Kun jarrutusenergia syötetään ajolinjoihin, tasoitetaan linjoissa tapahtuvaa jännitevaihtelua. Yhden junan jarrutusenergiaa voidaan käyttää toisen junan kiihdytykseen. Jos sähkövarasto kulkee junan mukana, voidaan ajaa sähkövaraston sallima matka ilman ajolinjojen jännitettä. Raideliikenteessä käytetään akkujen lisäksi superkondensaattoreihin perustuvia energiavarastoja. [34.]

6 Akkupohjaisen energiavaraston valinta ja mitoitusperiaatteet

Tässä työssä käsitellään akkuvaraston mitoitusta siten, että saadaan yleiskuva sähkövaraston tarvittavasta kapasiteetista sovellukseen verrattuna. Työssä tutkittiin muun muassa sairaalan varavoimalan vaatimuksia, ja akkuvaraston soveltuvuutta sairaalaympäristöön (ks. 5.5.1 Sairaalan varavoimajärjestelmä). Nykyään sähkökatkoksen aikana akuilla syötetään sähköä tärkeille laitteille sen aikaa, kunnes diesel-varavoimala käynnistyy.

6.1 Akuston mitoitus sairaalan UPS-käyttöön

Sairaaloissa elintoimintoja ylläpitävien laitteiden yhteydessä on omat akut, mutta leikkaussalien valaistukselle ja elintoimintojen valvontalaitteistoille on taattava lähes keskeytymätön sähkönsyöttö. Esimerkiksi leikkaussalien valaistukselle sallitaan 0,5 sekunnin katkos sähkönsyötössä. Tämä toteutetaan nykyään UPS-laitteistolla.

UPS:n mitoitus tehdään käynnistystilanteen ja tarvittavan oikosulkutehon perusteella. Käynnistystilanteessa muodostuu virtapiikkejä, jotka voivat olla kymmenkertaisia nimellisvirtaan verrattuna. Virtapiikit aiheutuvat erotusmuuntajista, joiden avulla sairaalassa käytettävä maadoittamaton sähkönjakeluverkko tehdään. Koska yksi virtamuuntaja ottaa käynnistystilanteessa hetkellisesti kymmenkertaisen virran (tai käynnistysvirran rajoittimella kuusinkertaisen), kokonaiskytkentävirta kasvaa erittäin

suureksi, jos virtamuuntajia on paljon. Virtapiikit hallitaan jakamalla verkko osiin. Kaikkea kuormaa ei kytketä samanaikaisesti päälle, vaan porrastaen.

Helsingin ja Uudenmaan sairaanhoitopiiriin kuuluvan Meilahden sairaaloissa UPS-järjestelmä koostuu yleensä kolmesta akkuryhmästä, joista yksi saa olla hetkellisesti pois käytöstä. UPS:n teho täytyy mitoittaa joskus jopa kymmenkertaiseksi, jotta virtapiikit hallitaan ja suojaukset toimivat eli sulakkeet palavat vikatilanteessa. [30.]

6.2 Tuulivoimalan tuotannon tasaus

Taulukossa 2 on tietoja eri puolilla maailmaa toteutuneista projekteista, joissa sähkövarastoa on käytetty tai käytetään tuulivoiman tuotannon tasaamiseen. Taulukosta nähdään tuulivoimalan ja akkupohjaisen energiavaraston tehojen suhteita. Taulukossa oleviin tyhjiin kohtiin ei löytynyt tietoja.

Taulukko 2. Sähkövaraston teho verrattuna tuulivoimalan tehoon [35; 36, s. 94; 24; 7]

sijainti	käyttöönotto- vuosi	tuulivoimalan teho / MW	akkuvaraston teho / MW	akkuvaraston kapasiteetti/MWh	akku- teknologia
USA, Texas	2012	153	36	-	-
Havaiji, Maui	2012	21	11	4,3	litium-ion
USA, Länsi- Virginia	2011	98	32	8	litium-ion
Japani, Futamata	2008	51	34	-	NaS
Venezuela	2010	11	3	0,845	nikkeli
Australia, King Island	2003	2,45	0,4	0,8	virtausakku

Taulukkoon kootut projektit ovat hyviä esimerkkejä sähkövaraston ja tuulivoimalan yhteiskäytöstä, mutta niiden avulla ei voida tehdä tarkkoja johtopäätöksiä sähkövaraston mitoitusperiaatteita varten. Akuston koko kuitenkin riippuu akkuteknologiasta ja tuulivoimalan tehosta. Lisäksi mitoituksessa täytyy ottaa huomioon muut mahdolliset käyttösovellukset.

6.3 Mitoitus energiavaraston valintatyökalulla

Sovelluksien teoreettisessa mitoituksessa käytettiin apuna energiavaraston valintaan suunniteltua työkalua. ES-Select on ohjelma, jonka on luonut Hollannissa pääkonttoria pitävä konsultointiyritys DNV KEMA. KEMA on lisensoinut ohjelman Yhdysvaltojen energiaministeriölle julkiseen käyttöön, ja ohjelma on ladattavissa Sandia National Laboratories -tutkimuskeskuksen kotisivujen kautta. [37.]

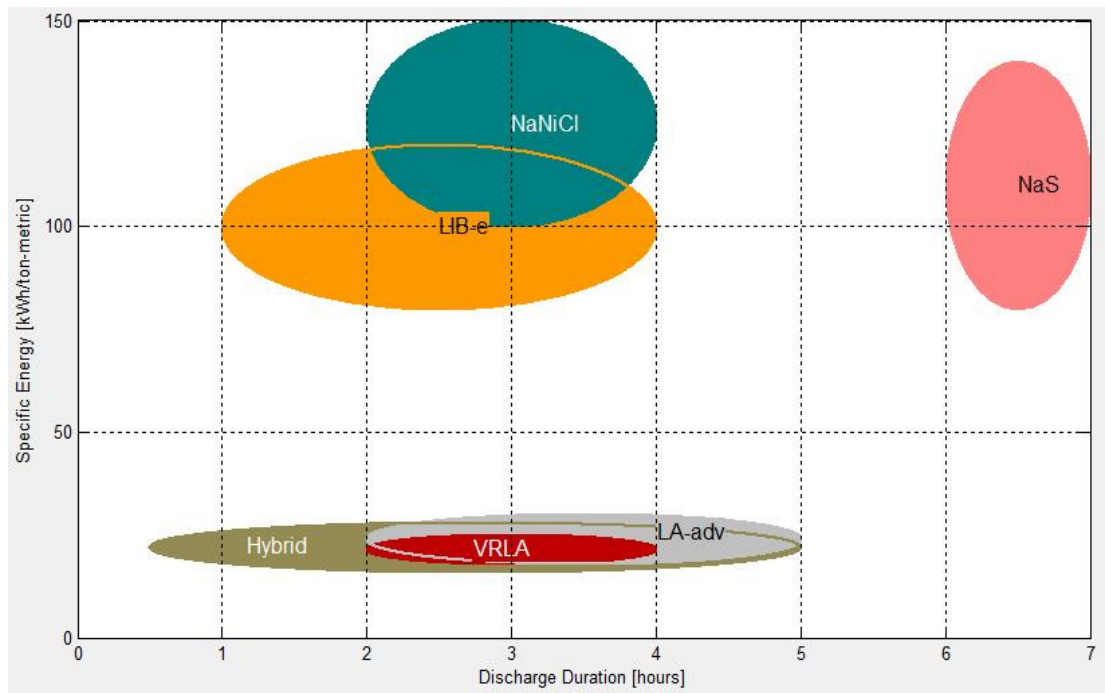
ES-Select-työkalulla valitaan ensin sähkövaraston sijainti sähköverkossa. Sijainnin perusteella voi valita käyttösovellukset, ja niiden mukaan ohjelma antaa sopivimmat sähkövarastoteknologiat sekä niiden ominaisuudet. (ks. liite 1)

ES-Select-ohjelmalla tehtiin simulaatio, jossa sähkövarastoa käytettiin viiteen eri käyttösovellukseen. Varaston sijainniksi asetettiin ”commercial/industrial”, jolla tarkoitetaan sähkövaraston olevan esimerkiksi teollisuuslaitoksen tai liikekeskuksen yhteydessä, ja sähkövaraston teho on korkeintaan 1 MW. Käyttösovelluksiksi valittiin

- huipputehon välttäminen
- varavoima
- sähkön laadun parantaminen
- taajuuden säätö
- tuotannon ja kulutuksen tasaus.

Ohjelma käsittelee valittuja sovelluksia siten, että ensimmäisenä valittu on ensisijainen käyttötarkoitus, seuraava on tärkeysjärjestyksessä toinen ja niin edelleen. Tehdyssä simulaatiossa tärkeysjärjestys on yllä olevan luettelun mukainen.

Kuvassa 6 (ks. seuraava sivu) on ohjelman ehdottamia akkuteknologioita ja niiden purkausaikojen suhde energiatiheuteen. Kuvaajassa vaaka-akselilla on varaston purkausaika tunneissa ja pystyakselilla energiatiheys (kWh/t tai Wh/kg).

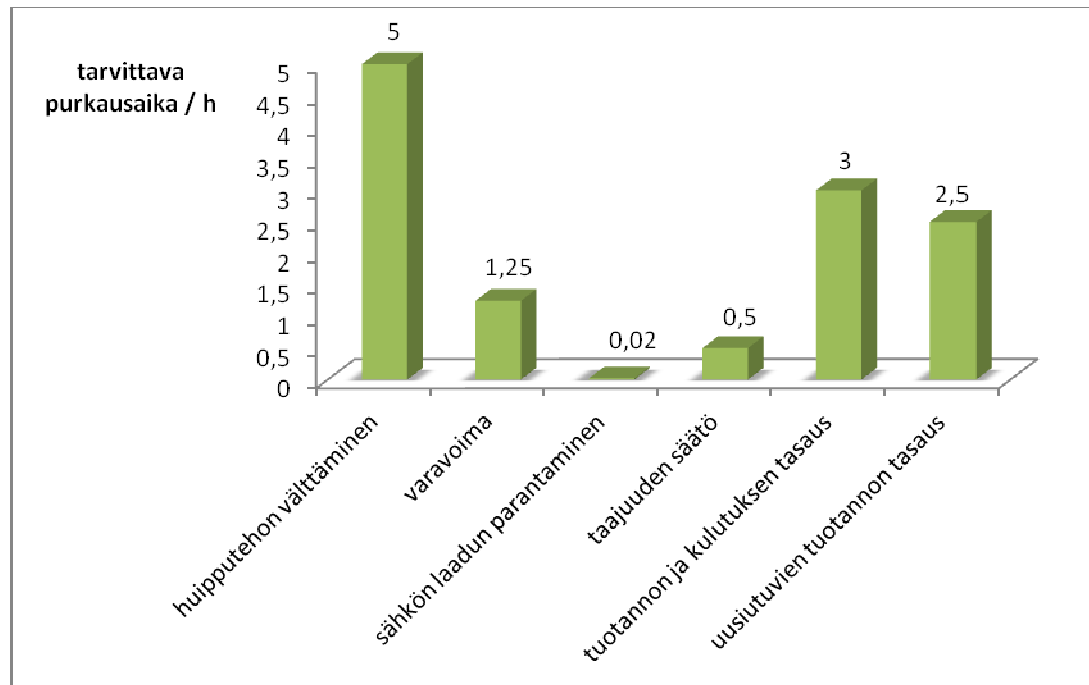


Kuva 6. Akkuteknologioiden purkausajan suhde energiatihyyteen [37]

Edellä mainituilla käyttösovelluksilla ohjelma ehdotti kuvan 6 mukaisia akkuteknologioita kuudeksi sopivimmaksi vaihtoehdoksi. Valintatyökalun mukaan sopivimpia teknologioita mainitussa järjestyksessä olivat natrium-akut (NaS ja NaNiCl), erilaiset lyijyakut (VRLA, Hybrid ja LA-adv) ja litium-ioni-akku (LIB-e). Lyijyakuista VRLA (engl. *Valve Regulated Lead Acid*) tarkoittaa suljettua lyijyakkua, Hybridillä tarkoitetaan lyijyakun ja superkondensaattorin yhteiskäyttöä, ja LA-adv (engl. *Advanced Lead Acid*) perinteisestä lyijyakusta kehitetty tehokkaampi versio. Kuvaajan pysty-akselilla on energiatiheys, ja vaaka-akselilla purkaus aika. Nämä arvot ovat siis ohjelmassa oletuksena asetettu kaikille akkutyypeille ja muille varastointiteknologioille. Myös muut ominaisuudet kuten kustannukset, hyötysuhde, elinikä ja esimerkiksi vasteaika ovat määritetty. Kaikki valitut käyttösovellukset, ja sähkövaraston ominaisuudet huomioiden ohjelma laskee, minkä tyyppinen sähkövarasto sopii parhaiten kyseiseen käyttöön.

ES-Select-työkalussa on määritetty kuinka suuren purkausajan mikäkin käyttösovellus vaatii. Tehtyyn simulaatioon valituille viidelle käyttösovellukselle oli asetettu oletusarvoiksi kuvan 7 (ks. seuraava sivu) mukaiset purkausajat (kuvaajassa keskimääräiset arvot). Kuvaajan ajat tarkoittavat sitä, että akkuvarastosta pitäisi pystyä syöttämään sähköä nimellisteholla kyseisen ajan.

Esimerkiksi, jos teollisuuslaitoksen varavoimalan vaadittu purkaus aika on 1,25 tuntia (ohjelmassa 0,5–2 tuntia), ja simulaation mukaisen sähkövaraston teho on korkeintaan 1 MW, niin tarvittavaksi kapasiteetiksi saataisiin korkeintaan 1,25 MWh.



Kuva 7. Energiavaraston purkausajoja eri käyttösovelluksissa [37]

ES-Select-työkalulla voi tarkastella myös taloudellista kannattavuutta. Sähkövarastot ovat vielä kokeilu- tai suunnitteluvaiheessa Suomessa, joten käytännön kokemusten puuttuessa on mielenkiintoista tarkastella taloudellisia näkökulmia ainakin teoriassa. Sähkövaraston valintatyökalulla tehtiin esimerkki akkupohjaisen energiavaraston kustannustehokkuudesta (ks. 7.3 Akkuvaraston kustannustehokkuus).

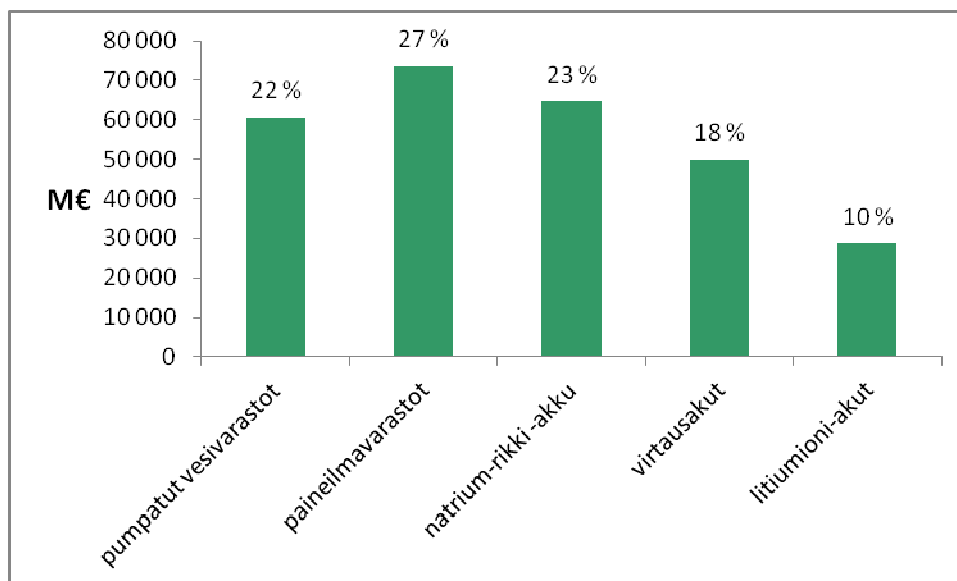
7 Akkupohjaisen energiavaraston kaupallistaminen

Sähkövaraston yleistymisellä olisi monia vaikutuksia sähköverkolle, markkinoille ja myös ympäristölle. Akkupohjaiselle energiavarastolle sopivia käyttösovelluksia on useita. Jos käyttösovelluksia tarkastellaan erikseen, jotkin vaikuttavat enemmän sähköjärjestelmän tehokkuuteen ja toimivuuteen, kun toisilla on isompi rooli taloudellisen hyödyn tavoittelemisessa. Esimerkiksi yöaikaan ladattu sähkö voidaan myydä päivällä, jolloin siitä hyödytään taloudellisesti. Toisaalta se ei juuri paranna

sähköverkon ominaisuuksia. Sähkövarastoa voi kuitenkin käyttää useaan tarkoitukseen, jolloin siitä hyödytään taloudellisessa ja teknisessä mielessä.

7.1 Sähkövaraston markkinat ja tulevaisuuden näkymät

BCG (Boston Consulting Group) on tehnyt maailmanlaajuisen arvion sähkövaraston kokonaismarkkinapotentiaalista eri varastointiteknologioille vuodelle 2030. Lähtökohtana markkinatutkimukselle on otettu eri sovellusten kysynnän arviointi. Niiden perusteella on ennustettu jokaisessa sovelluksessa käytetyn energiavaraston kumulatiivinen markkinapotentiaali ottaen huomioon sen taloudellinen hyödynnettävyys ja käyttöönoton vaikeusaste. Kuvassa 8 on BCG:n raportin arvoista tehty kaavio sähkövarastojen markkinaosuuksille. Lukuihin tulee suhtautua varauksella, mutta eri teknologioiden prosentuaalinen jakautuminen on varmasti suuntaa-antava.



Kuva 8. Sähkövarastojen kumulatiivinen markkinapotentiaali vuonna 2030 [4, s.15]

Kuvan 8 arviossa erilaisten akkuteknologioiden osuus jakautuu lähes tasan mekaanisten varastointimuotojen kanssa. Akkupohjaisten energiavarastojen osuus tulee todennäköisesti olemaan merkittävä myös Suomessa, sillä ainakin pumputut vesivarastot vaativat suuria korkeuseroja, joita Suomesta on haastavampi löytää. Lisäksi akkuvaraston rakenne eli modulaarisuus mahdollistaa käytön sähköverkon eri jännitetasoissa.

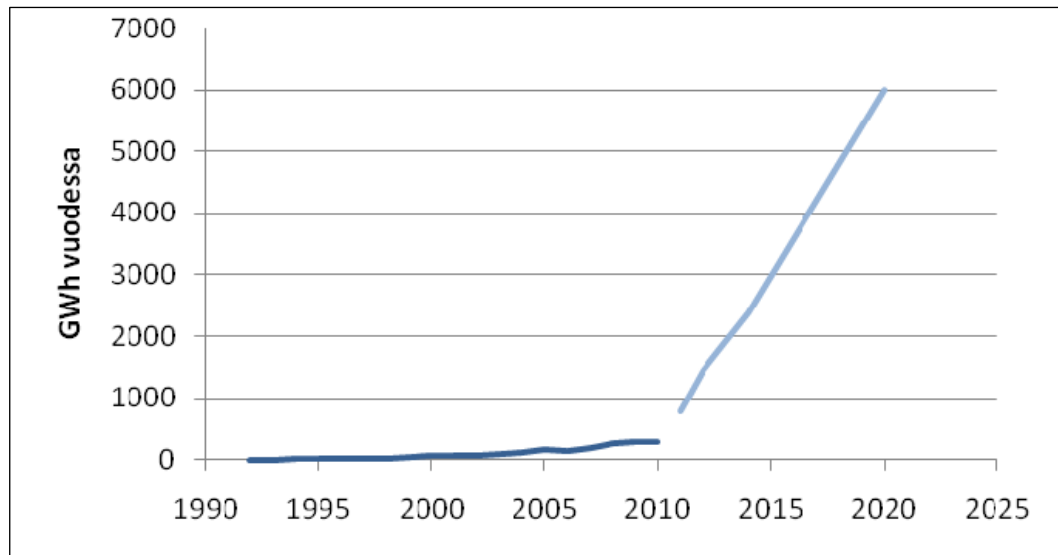
Suomen markkinoilla kantaverkkoyhtiö Fingrid on raportoinut kasvavasta taajuuden vaihtelusta, minkä vuoksi tarvitaan lisää säätövoimaa. Fingridin mukaan energian tuotannon ja käytön muutokset ovat vaikuttaneet sähköverkon taajuuden hallintaan. Ennen taajuuden vaihtelu oli vuositasolla pienempää ja pääosin riippuvaista vuodenajasta ja vesitilanteesta. Nykyään vaihtelu on suurempaa ja muutokset tapahtuvat vuorokaudenkin sisällä. Tehokas sähkön varastointi olisi yksi keino lisätä sähköverkon säätökykyä. [38.]

7.2 Tuulivoiman vaikutus sähkövaraston tulevaisuuteen

Uusiutuvan energiantuotannon osuuden odotetaan kasvavan Suomessa merkittävästi vuosina 2011–2020. Tuulisähkön epäsäännöllisen tuotannon lisääntyessä sähkön varastoinnin merkitys kasvaa. Muussa tapauksessa tarvitaan toisenlaista vakaata sähköntuotantoa korvaamaan tuulivoimaa tuulettomille ajankohdille. Toisaalta, vaikka tuulen voimakkuus vaihtelee, monen tuulivoimalan yhteistuotanto on paljon vakaampaa kuin yhden voimalan tuotanto. Se ei kuitenkaan poista sähkövaraston roolia tuotannon ja kulutuksen tasapainottajana.

Akkupohjaisen sähkövaraston markkinat ovat ainakin osittain riippuvaisia tuulivoimaloiden rakentamisesta, sillä tuulivoimalan tuotannon tasoitus on yksi akkuvaraston käyttösovellus. Suomen panostus tuulisähkön tukemiseen vaikuttaa omalta osaltaan sähkövaraston tulevaisuuteen. Jää nähtäväksi, tuleeko tuulivoimaloiden määrä kasvamaan yhtä nopeasti kuin on arvioitu.

VTT:n tekemästä tutkimuksesta ilmenee, että vuoden 2020 lopussa tuulivoiman kokonaiskapasiteetiksi ennustetaan 2 500 MW, joka vastaisi 6 000 GWh:a sähköntuotannossa. Kuva 9 (ks. seuraava sivu) havainnollistaa, kuinka tuulivoiman osuutta sähkön tuotannossa pyritään kasvattamaan.



Kuva 9. Tuulisähkön toteutunut tuotanto vuosina 1992–2010 sekä arvio vuosille 2011–2020. [39, s. 64]

Kuvassa 9 on esitetty vuosina 1992–2010 toteutunut tuulivoiman tuotanto, ja lisäksi VTT:n tekemä arvio tuulivoiman tuotannon kasvusta vuoteen 2020 asti. Arvio perustuu hallituksen esitykseen (HE 152/2010), jossa muun muassa ehdotetaan uusiutuvalla tavalla tuotetusta energiasta maksettavaa tuotantotukea. [39, s. 64–65.]

Edellä mainittu esitys muuttui laiksi (1396/2010), joka tuli voimaan 1.1.2011. Lain perusteella tuulivoimalla, biokaasulla, puupolttoaineella ja vesivoimalla tuotetusta sähköstä maksetaan tuotantotukea. Tuulivoimalan osalta tuotantotuen suuruus eli maksettava syöttötariffi on sähkön tavoitehinnan ja sähkön markkinahinnan (kolmen kk:n keskiarvo) erotus. Tuulivoimalan sähkön tavoitehinnaksi on sovittu 105,30 €/MWh vuoden 2015 loppuun saakka. Korotetun tavoitehinnan perusteella maksetaan tukea tuulivoimalalle kuitenkin korkeintaan kolme vuotta. Tämän jälkeen maksetaan normaalin tavoitehinnan mukaan, joka on 83,50 €/MWh. [40; 41.]

Esimerkiksi tariffijaksolla 1.7. - 30.9.2012 sähkön markkinahinnan kolmen kk:n keskiarvo oli 30,85 €/MWh. Maksettavaksi syöttötariffiksi saadaan 105,30 €/MWh - 30,85 €/MWh = 74,45 €/MWh. Suomessa maksetaan syöttötariffia enintään 12 vuotta.

Vertailun vuoksi mainittakoon, että Saksassa jokaiselle mantereella sijaitsevalle tuulivoimalalle maksetaan ensimmäiset viisi vuotta samansuuruisia, 89,30 €/MWh (v. 2012) alkumaksua. Ensimmäisten viiden vuoden jälkeen paremmat tuuliolosuhteet

omanneet voimalat saavat vähemmän tukea, ja heikomman tuloksen tehneet jatkavat samaan alkumaksuun oikeutettuna. Tariffisopimukset kestävät Saksassa 20 vuotta, mutta syöttötariffien suuruudet ovat kuitenkin laskeneet viime vuosina. [42, s. 10–11.]

7.3 Akkuvaraston kustannustehokkuus

Sähkövaraston taloudellista hyötyä määritettäessä on tiedettävä sähkövaraston kokonaiskustannukset ja -tulot. Akuston kokonaiskustannukset muodostuvat investoinnista, käytöstä, huollosta ja akkujen uusimisesta. Tuloja määritettäessä on otettava huomioon kaikki käyttösovellukset, joihin varastoa käytetään.

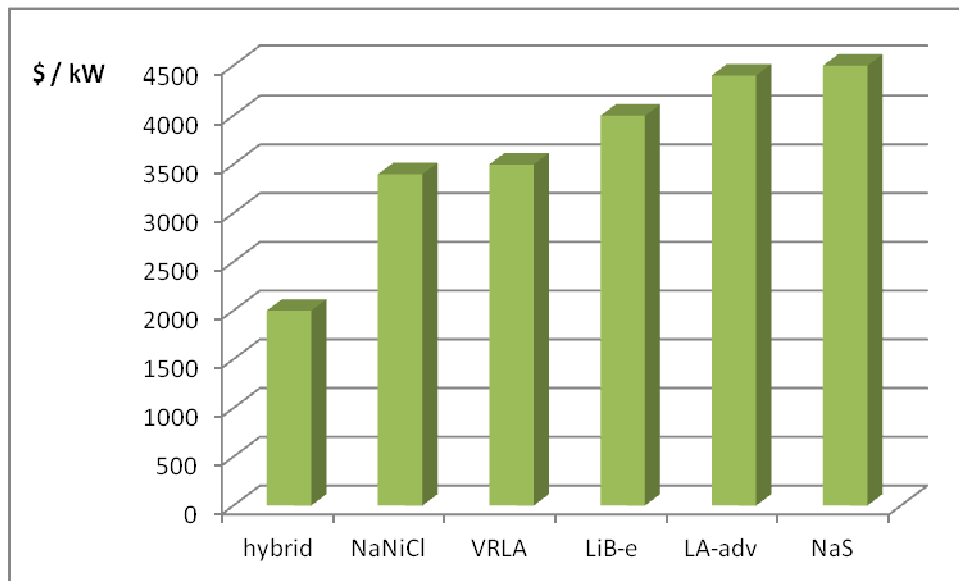
Sähkövaraston mitoitusta simuloitiin aikaisemmin ES-Select-ohjelmalla (ks. 6.2 Mitoitus energiavaraston valintatyökalulla). Samalla ohjelmalla tarkasteltiin myös kyseisten akkuvarastojen takaisinmaksuaikoja vastaavilla käyttösovelluksilla. Tulokseksi saatiin taulukon 3 mukaiset takaisinmaksuajat. Ohjelman käyttämät kaavat ja taloudelliset parametrit ovat liitteissä 2 ja 3.

Taulukko 3. ES-Select -ohjelman laskemat takaisinmaksuajat

akkuteknologia	takaisinmaksuvuodet
NaS	7–8
NaNiCl	5–6
VRLA	5–7
Hybrid	3–4
LA-adv	7–14
LiB-e	7–10

Nopeimman takaisinmaksun ohjelma arvioi lyijyakun ja superkondensaattorin yhdistelmällä (Hybrid) toteutetulle sähkövarastolle. Alle seitsemän vuoden takaisinmaksuaikaa ohjelma ehdotti natrium-nikkeli-kloridi-akulle ja suljetulle lyijyakulle (VRLA). Natrium-rikki -akkuihin (NaS) investoiminen maksaisi itsensä takaisin alle kahdeksassa vuodessa, ja korkean energiatiheyden litiumioni-akulle (LiB-e) ennustettiin 7–10 vuoden takaisinmaksuaikaa. Perinteistä lyijyakkua kehittyneemmälle lyijyakulle (LA-adv) ohjelma arvioi pisintä, jopa 14 vuoden takaisinmaksuaikaa.

Takaisinmaksuaikaan vaikuttavat luonnollisesti sähkövaraston kokonaiskustannukset ja -hyödyt. Kokonaiskustannukset eri akkutyypeille on kuvassa 10:



Kuva 10. Akkuteknologioiden kokonaiskustannuksia [37]

Kuvassa 10 on ES-Select-ohjelman laskemia kokonaiskustannuksia eri akkutyypeille, kun projektin iäksi on asetettu 15 vuotta. Ohjelma laskee sähkövaraston kokonaiskustannukset kaavalla

$$K_{\text{KOK}} = K_{\text{SV}} + K_{\text{AS}} + K_{\text{HUOLTO}} + K_{\text{KÄYTTÖH}} \cdot K_{\text{EN}} + K_{\text{AU}}, \quad (3)$$

jossa

- K_{KOK} on kokonaiskustannukset
- K_{SV} on sähkövaraston hinta
- K_{AS} on sähkövaraston asennuksen hinta (riippuu sijainnista)
- K_{HUOLTO} on sähkövaraston vuosittaiset huoltokustannukset
- $K_{\text{KÄYTTÖH}}$ on sähkövaraston käyttöhäviöt (kWh/vuosi/kW)
- K_{EN} on sähköenergian hinta
- K_{AU} on akkujen uusimisen kustannukset

Sähkövaraston taloudellisia hyötyjä on vaikea arvioida tarkkaan, mutta tehdyssä simulaatiossa ES-Select-ohjelma arvio valittujen käyttösovellusten vuosittaista tuottoa. Valitut sovellukset olivat huipputehon välttäminen, varavoima, sähkön laadun parantaminen, taajuuden säätö sekä tuotannon ja kulutuksen tasoitus. Ohjelman

mukaan näihin sovelluksiin käytettävän, korkeintaan 1 megawatin sähkövaraston arvo on 581–912 \$/kW vuodessa.

7.4 Sähköauton akkujen uusiokäyttö

Uusiokäyttö pienentäisi mahdollisesti sähköauton elinkaarikustannuksia. Akun syklisen eliniän katsotaan olevan lopussa, kun sen varauskykyä on jäljellä 70–80 %. Silloin sähköautoon on vaihdettava uusi akku. Käytetyllä akulla on kuitenkin runsaasti varauskykyä jäljellä, vaikka se ei sähköautoon enää sovellukaan. Sähköautojen vanhat akut voisivat olla käyttökelpoisia kiinteästi paikalleen asennettavassa sähkövarastossa.

ABB ja General Motors tutkivat sähköautoissa käytettyjen akkujen uudelleenkäyttöä energiavarastossa. Tutkimuksessa käytettiin akustoa, joka koostui viidestä Chevrolet Volt -sähköautossa käytetystä akkuyksiköstä. Kyseisistä akuista koottu varasto pystyi tuottamaan sähköä 3–5 keskiverto amerikkalaiselle kotitaloudelle kahden tunnin ajan. [43.]

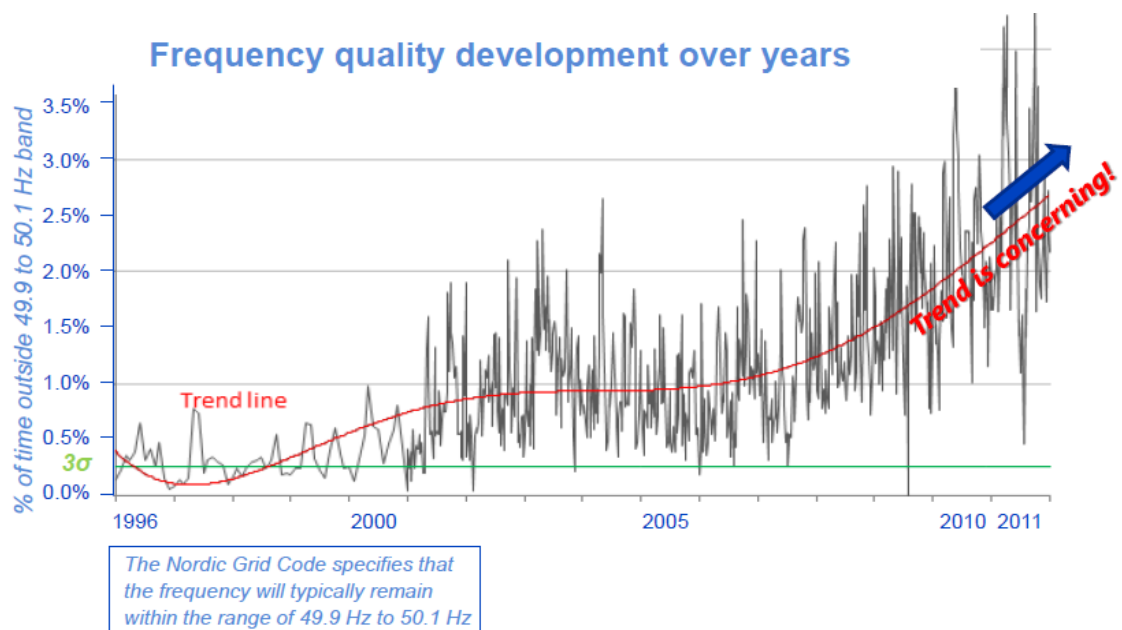
7.5 Energian varastointijärjestelmien standardisointi

IEC (*International Electrotechnical Commission*) on perustanut uuden teknisen komitean nopeuttamaan uusiutuvien tuotantotapojen integroimista sähköverkkoon. Tavoitteena on myös parantaa sähkön toimitusvarmuutta ja energiatehokkuutta. IEC:n mukaan sähkövarastoilla on tulevaisuudessa ratkaiseva rooli älykkään sähköverkon osana. Uusi komitea, TC 120: Electrical Energy Storage (EES) Systems, käsittelee energian varastointia koko järjestelmän kannalta. Uuden standardin tarkoitus on tukea teollisuutta edullisten ja luotettavien energian varastointijärjestelmien rakentamisessa. Komitea soveltaa käytännön kokemuksia ja kehittää toimintamalleja, jotta sähkövarastoja voidaan tulevaisuudessa liittää olemassa olevaan sähköverkkoon missä tahansa maailmassa. Komitea ottaa suosituksissaan huomioon myös turvallisuus- ja ympäristönäkökulmat. IEC:n mukaan standardoinnin ja oikean teknologian avulla valtioilla on paremmat lähtökohdat lisätä uusiutuvan energian tuotantotapoja. [44.]

8 Yhteenveto

Tässä työssä selvitettiin akkuteknologioihin perustuvan energiavaraston käyttösovelluksia ja mitoitusperiaatteita. Lisäksi tutkittiin sähkövaraston kaupallistamisen haasteita Suomessa.

Sähkön varastointi on yksi keino, jolla voidaan mukautua Suomen sähköverkossa tapahtuviin muutoksiin. Tulevaisuudessa uusiutuvan energian tuotantoa pyritään lisäämään (ks. 7.2 Tuulivoiman vaikutus sähkövaraston tulevaisuuteen). Useiden tuulivoimaloiden tuotannon tasaamiseen tarvitaan todennäköisesti suuria energiavarastoja, joiden kustannukset ovat nykyään suhteellisen korkeat. Toinen muutos on verkkotaajuuden kasvava vaihtelu. Kantaverkkoyhtiö Fingrid on raportoinut taajuuden vaihtelun olevan nykyään suurempaa kuin ennen [38].



Kuva 11. Taajuuden vaihtelu sallittujen rajojen ulkopuolella [38.]

Kuvasta 11 havaitaan selkeästi, kuinka taajuuden vaihtelu on suurempaa kuin aikaisempina vuosina. Pystyakselilla on aika, jolloin taajuus on ollut alle 49,9 Hz tai yli 50,1 Hz. Esimerkiksi vuonna 2005 taajuus oli keskimäärin yhden prosentin ajan vuodesta sallitun alueen ulkopuolella, kun vuonna 2011 vastaava luku oli noin 2,5 %.

Taajuuden säätöön voidaan osallistua pienemmilläkin sähkövarastoilla. On mahdollista, että pienemmän kokoluokan sähkövarastot yleistyvät ennen suuria varastoja. Silloin saataisiin todellisia teknisiä ja taloudellisia tuloksia, joiden perusteella voitaisiin investoida suurempiin varastoihin. Siksi lähitulevaisuudessa sopivimpia käyttösovelluksia akkuvarastolle voisivat olla ne sovellukset, joihin ei tarvita kovin suurta kapasiteettia, kuten

- taajuuden säätö
- lyhytaikainen varavoima
- huipputehon välttäminen
- sähkön laadun parantaminen.

Akkupohjaisen sähkövaraston ominaisuudet soveltuvat hyvin taajuuden säätöön. Säätö tapahtuu erittäin nopeasti, sillä akuista saadaan siirrettyä sähköenergiaa verkkoon (tai toisinpäin) lähes viiveettä. Sandia National Laboratories -tutkimuskeskuksen tekemän raportin mukaan näiden ominaisuuksien vuoksi akkuvarastosta saataisiin kaksi kertaa enemmän säätötehoa kuin perinteisistä tuotantolaitoksista. Akkuvarastolla voidaan mahdollisesti osallistua taajuudensäätöön samalla kun akkuja ladataan tai puretaan. Tämä tarkoittaisi ainakin teoriassa sitä, että esimerkiksi 1 MW:n tehoisesta akkuvarastosta saataisiin 2 MW:n edestä taajuuden säätövoimaa. Käytännössä täytyisi ottaa huomioon sähkövaraston hyötysuhteen mukaiset energiahäviöt. Sandia National Laboratories toteaakin, että aihe vaatii vielä jatkotutkimusta. [45, s. 79.]

Työssä oli tavoitteena myös selvittää sähkövaraston mitoitusperiaatteita. Tehdyn selvityksen perusteella voidaan todeta, että sähkövaraston teknologian valintaan vaikuttavat varaston sijainti sähköverkossa ja käyttösovellukset. Sijainti rajoittaa käyttösovellusten määrää. Mitoitus riippuu käyttösovelluksessa tarvittavasta purkausajasta. Kun käyttösovelluksia on useita, sähkövarasto täytyy mitoittaa sen sovelluksen mukaan, joka vaatii suurimman purkausajan.

Lisäksi työssä tutkittiin sähkövaraston kaupallistamisen haasteita, ja kolme pääseikkaa korostui työn edetessä. Ensinnäkin kaupallistaminen edellyttää, että sähkövarastolle olisi todellinen tarve. Ainakin edellä mainitut tuulivoiman lisääminen ja kasvava verkkotaajuuden vaihtelu ovat Suomessa tapahtuvia muutoksia, joihin voidaan vaikuttaa sähkön varastoinnilla.

Toiseksi sähkövaraston tulee olla riittävän kustannustehokas. Akkujen kapasiteettiin, elinikään ja turvallisuuteen tarvitaan kehitystä. Toisaalta akkuvaraston kustannustehokkuus paranee, jos varastoa käytetään useaan eri sovellukseen, jolloin hyödytkin ovat suuremmat.

Kolmanneksi käytännön kokemuksia ja esimerkkejä tarvitaan, jotta saadaan tarkempia näyttöjä todellisista taloudellisista ja teknisistä hyödyistä. Tällainen hyvä esimerkki olisi Helsingin Kalasatama-projekti, jossa tavoitteena on muun muassa kokeilla käytännössä akkupohjaisen energiavaraston toimintoja ja hyötyjä [28].

Lähteet

- 1 Virtanen, Ville. 2010. Energian varastointimuodot. Verkkodokumentti. <http://www.physics.utu.fi/projects/kurssit/UFYS2100/muuta/Luk_Virtanen.pdf>. Luettu 25.10.2012.
- 2 Dinger, Andreas. Martin, Ripley. Mosquet, Xavier. Rabl, Maximilian. Rizoulis, Dimitrios. Russo, Massimo. Sticher, Georg. 2010. Verkkodokumentti. <<http://www.bcg.com/documents/file36615.pdf>>. Tammikuu 2010. Luettu 13.11.2012.
- 3 Pumped Hydro (PH), Technology Description. 2012. Verkkodokumentti. Electricity Storage Association. <http://www.electricitystorage.org/technology/storage_technologies/pumped_hydro/>. Luettu 20.11.2012.
- 4 Pieper, Cornelius. Rubel, Holger. 2011. Verkkodokumentti. <<http://www.bcg.com/documents/file72092.pdf>>. Luettu 30.10.2012.
- 5 Compressed air energy storage has bags of potential. 2011. Verkkodokumentti. The Engineer. <<http://www.theengineer.co.uk/in-depth/the-big-story/compressed-air-energy-storage-has-bags-of-potential/1008374.article>>. 25.4.2011. Luettu 21.11.2012.
- 6 How the Hydrostar System Works. 2012. Verkkodokumentti. Hydrostor. <<http://hydrostor.ca/technology/>>. Luettu 21.11.2012.
- 7 Electricity Storage - Technology Brief. 2012. Verkkodokumentti. IRENA. <<http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Electricity%20Storage%20-%20Technology%20Brief.pdf>>. Luettu 7.1.2013.
- 8 Jokela, Jari. 2011. Kondensaattori ja superkondensaattori. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 9 EnerGstor Wayside Energy Storage. 2010. Verkkodokumentti. Bombardier, the evolution of mobility. <<http://www.bombardier.com/en/transportation/products-services/eco4-technologies/energstor-wayside-energy-storage?docID=0901260d8013060c>>. Luettu 4.1.2012.
- 10 Battery systems (for Rail & Mass transit applications). 2012. Verkkodokumentti. SAFT. <http://www.saftbatteries.com/Technologies_Batterysystemschargers_forRailmasstransitapplications_397/Language/en-US/Default.aspx>. Luettu 4.1.2012.

- 11 Electrical Energy Storage. 2011. Verkkodokumentti. IEC.
<<http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-energystorage-LR-en.pdf>>. Luettu 7.1.2013.
- 12 Decentralised storage: Impact on future distribution grids. 2012. Verkkodokumentti. Eurelectric.
<http://www.eurelectric.org/media/53340/eurelectric_decentralized_storage_finalecover-2012-030-0574-01-e.pdf>. Luettu 6.11.2012.
- 13 Eskola, Miikka. 2011. Energiavarastojen mitoitus laivasähköjärjestelmään. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- 14 Mistä lisäjoustoa sähköjärjestelmään?. 2012. Verkkodokumentti. Energiateollisuus ry. Fingrid Oyj. <<http://energia.fi/julkaisut/mista-lisajoustoa-sahkojarjestelmaan>>. Luettu 29.11.2012.
- 15 Seppälä, Sanna. 2011. Sähköautojen akkujen kemia. Insinööri työ. Metropolia Ammattikorkeakoulu.
- 16 Lithium-Based Batteries. 2013. Verkkodokumentti. Battery University.
<http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries>. Luettu 19.2.2013.
- 17 Advancements in Batteries. 2013. Verkkodokumentti. Battery University.
<http://batteryuniversity.com/learn/article/global_battery_markets>. Luettu 1.3.2013.
- 18 Scoltock, James. 2013. Power drivers. Automotive Engineer, January-February 2013.
- 19 Patel, Prachi. 2011. Advanced Electrodes for Better Li-Ion Batteries. Verkkodokumentti. MIT, Technology review.
<<http://www.technologyreview.com/news/425088/advanced-electrodes-for-better-li-ion-batteries/>>. Luettu 13.11.2012.
- 20 World record energy density of 400 Wh/kg. 2013. Verkkodokumentti. Envia Systems. <<http://enviasystems.com/announcement/>>. Luettu 27.2.2013.
- 21 Battery Material Prevents Fires, Stores Five Times the Energy. 2013. MIT Technology Review. <<http://www.technologyreview.com/news/510311/battery-material-prevents-fires-stores-five-times-the-energy/>>. Luettu 31.1.2013.
- 22 Upgrading the vanadium redox battery. 2011. Verkkodokumentti. Pacific Northwest National Laboratory. <<http://www.pnl.gov/news/release.aspx?id=855>>. Luettu 13.11.2012.

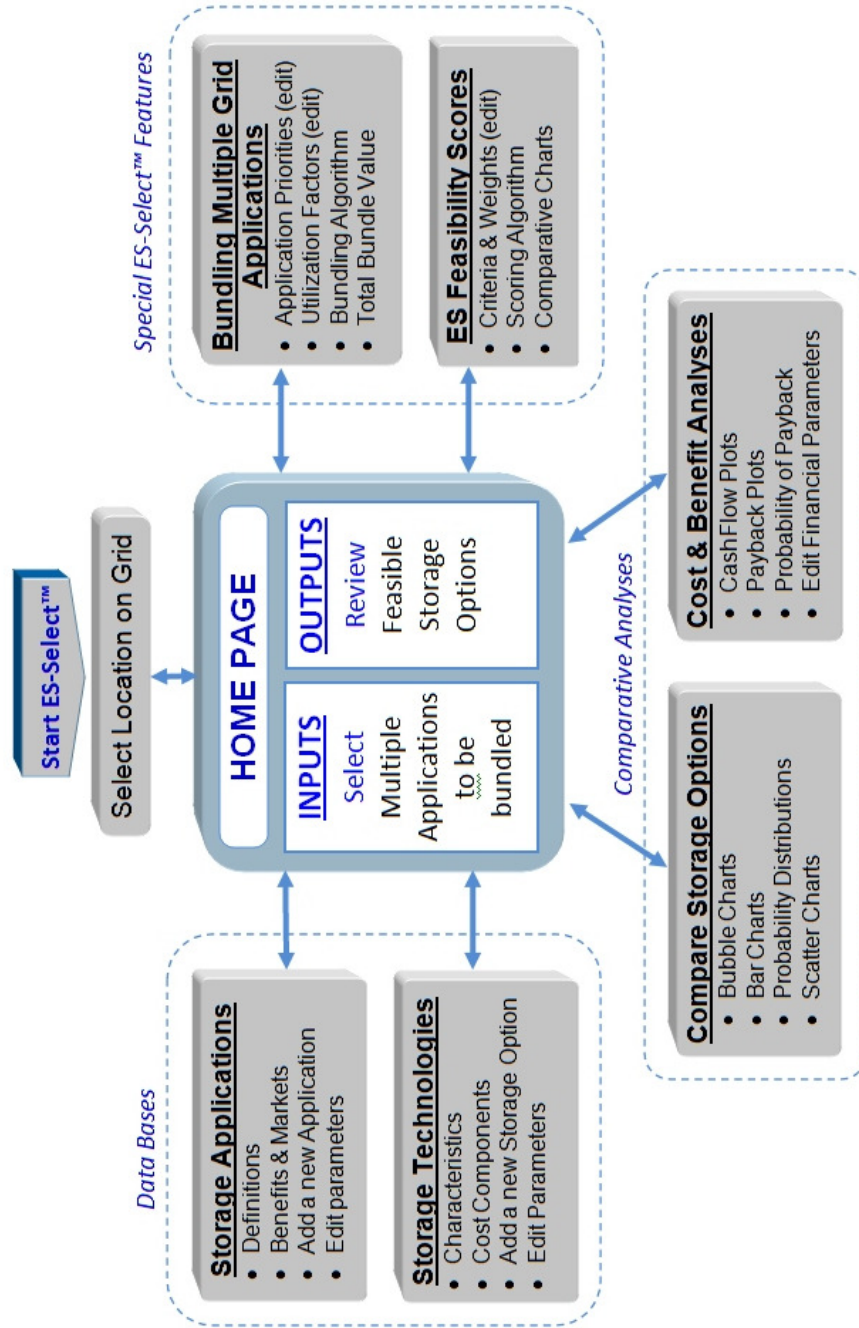
- 23 Siestorage. 2012. Verkkodokumentti. Siemens.
<http://www.automation.siemens.com/mcms/totally-integrated-power/en/siestorage/Documents/SIESTORAGE_EN.pdf>. Luettu 9.11.2012.
- 24 A123 Systems Grid Solutions. 2011. Verkkodokumentti. A123 Systems.
<<http://www.a123systems.com/smart-grid-storage.htm>>. Luettu 2.11.2012.
- 25 Älykäs verkko eli Smart Grid. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/alykas-verkko>>. Luettu 27.2.2013.
- 26 Energian mittaus. Verkkodokumentti. Energiateollisuus.
<<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/energian-mittaus>>. Luettu 27.2.2013.
- 27 Sähkön varastoinnin tarve kasvussa. 2013. Verkkodokumentti. Kemijoki Oy.
<http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/sp_Content87101>. Luettu 16.2.2013.
- 28 Hyvärinen, Markku. 2012. Verkkodokumentti. Helen Sähköverkko Oy.
<http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/sahkomarkkinat/Sahkoverkko/esitys_hyvarinen.pdf>. Luettu 29.11.2012.
- 29 Jännitteen ylläpito. Verkkodokumentti. Fingrid Oyj.
<<http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/voimaj%C3%A4rjestelm%C3%A4nhallinta/k%C3%A4ytt%C3%B6varmuuden%20yll%C3%A4pito/j%C3%A4nnetteen%20yll%C3%A4pito/Sivut/default.aspx>>. Luettu 1.3.2013.
- 30 Käyhkö, Kalevi. 2013. Käyttöpäällikkö, HUS, Helsinki. Haastattelu 28.1.2013.
- 31 Piirto, Tuukka. 2011. Hajautetun tuotannon ja saarekeverkon tehotasapainon ylläpitäminen akustolla. Verkkodokumentti.
<http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Piirto_Tuukka_julk.pdf>. Luettu 28.2.2013.
- 32 Electricity Storage And Renewables for Island Power. 2012. Verkkodokumentti. IRENA.
<<http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/Electricity%20Storage%20and%20RE%20for%20Island%20Power.pdf>>. Luettu 28.2.2013.
- 33 Stenberg, Juha. 2013. Sähköautojen latausverkosto on edellytys sähköautoille Suomessa. Verkkodokumentti.
<<http://www.verkostomessut.fi/verkosto/liitetiedostot/materiaalipankki/639.pdf>>. Luettu 6.2.2013.
- 34 Energy Storage and Inverter solutions. 2012. Verkkodokumentti. Siemens.
<<http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/rail-electrification/dc-traction-power-supply/Pages/mobile-energy-storage.aspx>>. Luettu 15.1.2013.

- 35 Duke Energy Renewables completes Notrees Battery Storage Project in Texas; North America's largest battery storage project at a wind farm. 2013. Verkkodokumentti. Duke Energy. <<http://www.duke-energy.com/news/releases/2013012301.asp>>. Luettu 28.2.2013.
- 36 Grid integration of large-capacity Renewable Energy sources and use of large-capacity Electrical Energy Storage. 2012. Verkkodokumentti. IEC. <<http://www.iec.ch/whitepaper/pdf/iecWP-gridintegrationlargecapacity-LR-en.pdf>>. Luettu 7.1.2013.
- 37 ES-Select Tool. Verkkodokumentti. Sandia National Laboratories. <<http://www.sandia.gov/ess/esselect.html>>. Luettu 27.2.2013.
- 38 Jyrinsalo, Jussi. 2012. Energiantuotannon ja -käytön muutosten vaikutukset voimajärjestelmän hallintaan ja kantaverkon kehitystarpeisiin. Verkkodokumentti. Fingrid Oyj. <http://energia.fi/sites/default/files/dokumentit/energiateollisuus/Tutkimus/ST-pooli/esitys_jyrinsalo.pdf>. Luettu 26.2.2013.
- 39 Lindroos, Tomi J. Soimakallio, Sampo. Savolainen, Ilkka. Monni, Suvi. Honkatukia, Juha. 2012. Verkkodokumentti. VTT Technology. <http://www.vtt.fi/vtt_show_record.jsp?target=julk&form=sdefe&search=67387>. Luettu 27.12.2012.
- 40 Laki uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. 1396/2010. 2§.
- 41 Syöttötariffin määräytyminen ja markkinahinnat. 2012. Verkkodokumentti. Energiamarkkinavirasto. <<http://www.emvi.fi/alasivu.asp?gid=483&languageid=246>>. Luettu 28.12.2012.
- 42 Fulton, Mark. Capalino, Reid. Auer, Josef. 2012. Verkkodokumentti. The German Feed-in Tariff: Recent Policy Changes. <http://www.dbresearch.com/PROD/DBR_INTERNET_EN-PROD/PROD0000000000294376/The+German+Feed-in+Tariff%3A+Recent+Policy+Changes.pdf>. Luettu 28.12.2012.
- 43 GM and ABB demonstrate Chevrolet Volt Battery Reuse – world's first use of electric vehicle batteries for homes. 2012. Verkkodokumentti. <<http://www.abb.com/cawp/seitp202/8cb38a9d23816174c1257ab500497848.aspx>>. Luettu 19.12.2012.
- 44 Electrical Energy Storage Systems (EES) development to be facilitated. 2012. Verkkodokumentti. IEC. <<http://www.iec.ch/newslog/2012/nr1412.htm>>. Luettu 6.11.2012.
- 45 Eyer, Jim. Corey, Garth. Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide. 2010. Verkkodokumentti. Sandia National

Laboratories. <http://www.sandia.gov/ess/publications/pubslis_06.html>. Luettu
25.3.2013

ES-Select-ohjelma toiminnot

ES-Select™ Design and Functionalities



ES-Select -ohjelman käyttämät kaavat


Key Parameters and Equations used in ES-Select™ calculations

	Abb.	Parameters	Display Unit	Calculation	Comments
1	ACM	Annual Cost of Maintenance	\$/yr/kW	Input from Database	Normalized to the storage rated power
2	ACOL	Annual Cost of Operational Losses	\$/yr/kW	= AOL x CE/1000	
3	ADD	Required Application Discharge Duration	cycles	Input from Database	
4	AMP	Application Market Potential in 10 years	GW	=1000 x Ec10 / PV10	
5	AnB	Annual Benefit	\$/kW	Input from Database	
6	AnE	Annual Expenses	\$/yr/kW	= ACM + ACOL	Estimated operating expenses in \$/yr normalized to the storage rated power
7	AOL	Annual Operational Losses (of storage)	kWh/yr/kW		Normalized to the storage rated power
8	CE	Cost of Energy for charge	\$/MWh	User input or default value	
9	CL10	Cycle Life at 10% depth of discharge	Cycles	Input from Database	
10	CL80	Cycle Life at 80% depth of discharge	Cycles	Input from Database	
11	CLC10	Storage Equipment cost per cycle at 10% dod.	Cents/kW	= SCw / CL10	See note for CLC80
12	CLC80	Storage Equipment cost per cycle at 80% dod.	cents/kW	= SCw / CL80	This is the capital cost per cycle the storage is used, regardless of the discharge duration
13	dod	Depth of Discharge	%	10% or 80% (from database)	
14	DR	Discount Rate	%/yr	User input or default value	
15	EB	Escalation of Benefits	%/yr	User input or default value	
16	Ec10	10-year Economy (total benefits)	\$ billions	Input from Database	


ES-Select-ohjelman käyttämät kaavat

17	EFF	AC roundtrip Energy efficiency	%	Input from Database	
18	FA	Storage Feasibility Score for meeting Application requirements	%	Input from Database	Different scores based on power, energy and frequency of use.
19	FC	Fixed Charge Rate	%/yr	User input or default value	
20	FCh	Storage Feasibility Score for Cost in \$/kWh	%	$= 500 / (500 + SCh)$	Based on the AC equipment cost in \$/kWh
21	FCw	Storage Feasibility Score for Cost in \$/kW	%	$= 1500 / (1500 + SCw)$	Based on the AC equipment cost in \$/kW
22	FL	Storage Feasibility Score for selected Location	%	Input from Database	Different scores for different location on the grid
23	FM	Storage Feasibility Score for Maturity	%	Input from Database	Commercial maturity based on whether it is experimental, prototype, pre commercial or fully commercial
24	InCw	Installation Cost	\$/kW	Input from Database	Installation cost varies at different locations on the grid
25	InCh	Installation Cost	\$/kWh	$= InCw / SDD$	
26	ISCh	Installed Storage Cost	\$/kWh	$= ISCw / SDD$	
27	ISCw	Installed Storage Cost	\$/kW	$= SCw + InCw$	
28	LTC10	Storage Equipment cost per lifetime throughput energy at 10% dod.	cents/kWh	$= SCw / LTE10$	See note for LTC80
29	LTC80	Storage Equipment cost per lifetime throughput energy at 80% dod.	cents/kWh	$= SCw / LTE80$	This is a levelized cost of storage for total expected output energy to be delivered over its lifetime. This is based on storage ability to cycle energy whether it is actually used or not.

ES-Select-ohjelman käyttämät taloudelliset parametrit



ES-Select™. Financial Parameters
Please modify these parameters to achieve a better match to your actual project case.



Sandia National Laboratories

Escalation of Benefits (%)

Discount Rate (%)

Electricity Price Escalation (%/yr)

Cost of Energy for charge (\$/MWh) Low High

Project Life

10 years

15 years

20 years

Meaning of terms

Escalation of Benefits is a percentage at which an annual change in the value of benefits is expected to occur.

Discount Rate is the rate of return as a percentage used to calculate the multiplier that converts the anticipated future value (return) to the present value.

Electricity Price Escalation is the rate of increase of the electricity cost used for calculating the cost of operational losses through the life of a project.

Cost of Energy for Charge is what needs to be paid at off-peak time to charge an energy storage device. This is used to calculate the annual cost of operational losses.

Project Life defines the length of the period for which the cash flow and payback values are calculated.

[Return](#)
[Print](#)