

Juha Seppänen

Sähköenergian varastointitekniikat älykkäässä sähköverkossa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

4.5.2014

Tekijä Otsikko Sivumäärä Aika	Juha Seppänen Sähköenergian varastointitekniikat älykkäässä sähköverkossa 44 sivua + 1 liite 4.5.2014
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkötekniikan koulutusohjelma
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehto
Ohjaaja	lehtori Sampsa Kupari, Metropolia Ammattikorkeakoulu
<p>Sähkön varastoinnilla on tulevaisuuden sähköverkoissa tärkeä tehtävä, kun uusiutuvien energianlähteiden ja hajautetun tuotannon määrät kasvavat nykyisestä huomattavasti. Jotta asetetut tavoitteet ekologisuudelle, energiatehokkuudelle ja sähköverkon toimivuudelle täytyisivät, ne vaatisivat energiavarastojen hyödyntämistä. Energia- varastojen kokonaiskustannusten täytyy kuitenkin olla kilpailukykyisiä muiden vaihtoehtojen rinnalla, jotta niitä käytettäisiin laajasti.</p> <p>Insinööritöyssä selvitetään sähkönvarastoinnin roolia tulevaisuuden älykkäissä sähkö- verkoissa sekä esitetään joukko yleisimpiä sähkönvarastointitekniologioita. Tämän lisäksi työssä selvitetään tarvittavien energiavarastojen määrää tulevaisuudessa Suomessa sekä maailmanlaajuisesti, jotta asetetut tavoitteet uusiutuvien energianlähteiden käytöstä voisivat toteutua.</p> <p>Työssä esitetään useita eri sähkön varastointitekniologioita ja arvioidaan niiden etuja ja heikkouksia sekä tulevaisuuden mahdollisuuksia. Suomen osalta arvioidaan sopivimpien energiavarastojen soveltuvuutta Suomen olosuhteisiin ja arvioidaan varastoinnin tarpeellisuutta tulevaisuudessa. Tietoa on kerätty useista eri julkaisuista, insinööritöistä sekä artikkeleista, jotka liittyvät aihepiiriin. Energiavarastojen määrän arviointiin käytetään läntisen Euroopan ja muun maailman osalta IEA:n tekemää laajaa tutkimusta aiheesta. Suomen osuuden arviointiin käytetään Fingridin ja VTT:n lausuntoa sekä Fingridin teettämää diplomityötä tarvittavan säätötarpeen määrästä sekä tutkitaan erilaisia julkaisuja.</p> <p>Tehdyn tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että energiavarastojen käyttö tulevaisuudessa kasvaa vääjäämättä, koska sähköverkon on kyettävä sopeutumaan tuleviin muutoksiin. Se, kuinka nopeasti tämä tapahtuu, riippuu niin teknisten kuin taloudellistenkin haasteiden aiheuttamista viiveistä ja maiden yksilöllisistä tarpeista. Tutkimuksen perusteella voidaan myös todeta, että energian varastoinnilla on tulevaisuudessa useita eri tehtäviä kuten taajuuden säätö, varavoimana toimiminen, uusiutuvien energianlähteiden tuotannon ja kuormien tasaaminen sekä katkoton sähkön jakelu.</p>	
Avainsanat	sähköenergia, energiavarasto, älykäs sähköverkko

Author Title	Juha Seppänen Energy Storage Technologies in Smart Grid
Number of Pages Date	44 pages + 1 appendix 4 May 2014
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructor	Sampsa Kupari, Senior Lecturer, Helsinki Metropolia University of Applied Sciences
<p>Energy storages will have an important role in electrical power grid in the future, as the share of renewable energy sources and decentralized energy production will considerably increase. To meet the targets set for ecology, energy efficiency and operability, it would require the use of energy storages. However, if energy storages were widely used, their costs should be competitive compared to other technologies.</p> <p>This thesis examines the role of energy storages in future smart grids and presents the most common energy storage technologies. Furthermore, this paper investigates the needed energy storage capacity in Finland and globally in the future, so that targets set for renewable energy sources could be met.</p> <p>This paper presents several different energy storage technologies and evaluates their advantages and disadvantages, as well as future potential. It evaluates the most suitable energy storages for the Finnish circumstances, as well as evaluates the necessity of storages in the future. Information was collected by reading several different publications, theses and articles connected with the topic. An extensive study by IEA was used to evaluate the amount of energy storages in Europe and rest of the world. To estimate the reserve need in Finland, the report of VTT and Fingrid, the Master's thesis by Fingrid and different kinds of publications were used.</p> <p>On the basis of this study, it can be concluded that the use of energy storages will inevitably increase in the future, because the electrical power grid must be able to adapt to future changes. How rapidly this will happen, depends on delays of technical and economical challenges and needs of countries. On the basis of the study it can also be concluded, that energy storages will have many different functions in the future, such as frequency stability, backup capacity, smoothing fluctuations in generation and stable energy distribution.</p>	
Keywords	electrical power, energy storage, smart grid

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Älykäs sähköverkko	1
3	Sähkön varastointi älykkäässä sähköverkossa	3
4	Sähköenergian varastointiteknologiat	4
4.1	Pumppuvoimalaitokset	6
4.2	Paineilmavarastot	8
4.3	Vauhtipyörä	10
4.4	Akut	13
4.5	Litiumakut	14
4.6	Natriumrikkiakut	15
4.7	Virtausakut	15
4.8	Suprajohtava magneettinen energiavarasto	16
4.9	Superkondensaattorit	18
4.10	Varastointiteknologioiden vertailu	19
5	Energiavarastojen sijoittuminen ja niiden tehtävät eri sovelluskohteissa älykkäässä sähköverkossa	22

5.1	Sähkövarastojen sijoitus älykkäässä sähköverkossa	24
5.2	Energiavarastojen merkitys tuuli- ja aurinkoenergian laajan käytön mahdollistamisessa	26
5.3	Mikroverkot ja saarekekäyttö	28
5.4	Energiavarastojen merkitys sähkön laadussa	30
5.5	Sähköautojen merkitys älykkäässä sähköverkossa	30
5.6	Kuluttajien omat sähkövarastot ja niiden rooli hajautetussa energian tuotannossa ja sähkön siirrossa	31
6	Sähkön varastointi sekä tulevaisuuden tarpeet globaalisti ja Suomessa	32
6.1	Varastoinnin tarve globaalisti ja läntisessä Euroopassa tulevaisuudessa	32
6.2	Varastoinnin tulevaisuuden tarpeet Suomessa	35
7	Suomeen soveltuvat varastointiteknologiat	37
7.1	Suuren kokoluokan energiavarastot Suomessa	38
7.2	Akkuteknologioiden käyttö Suomessa tulevaisuudessa	38
7.3	Sähköautojen käyttö Suomessa tulevaisuudessa	39
7.4	Vesivoiman varastointi	40
8	Yhteenveto	40
	Lähteet	42
	Liitteet	

Liite 1. Tyypillisten sähkövarastojen ominaisuuksien vertailu

Lyhenteet

CAES	Compressed Air Energy Storage; paineilmalla toimiva energiavarasto
DLC	Double Layer Capacitor; superkondensaattori
EES	Electrical Energy Storage; sähkövarasto
EV	Electric Vehicle; sähköauto
FES	Flywheel Energy Storage; vauhtipyörä, liike-energian varasto
Li - ion	Lithium - ion; litiumioniakku
NaS	Sodium Sulfur Battery; natriumrikkiakku
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle; ladattava hybridisähköauto
PHS	Pumped Hydro Storage; pumpattu vesivarasto
RFB	Redox Flow Battery; virtausakku
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage; suprajohtava magneettinen energiavarasto

1 Johdanto

Sähkön varastointi on olennaisessa roolissa älykkään sähköverkon toiminnassa. Älykkäässä sähköverkossa sähköenergian varastointitekniikoita tarvitaan muun muassa tasapainottamaan vaihtelevaa sähköntuotantoa kuten tuulivoimaa ja aurinkovoimaa. Varastointia tarvitaan myös katkottoman sähkön jakelun takaamiseen, kuluttajien oman tuotannon varastointiin ja siirtämiseen verkkoon sekä reservitehoon. Tässä insinööriyössä tutkitaan sähköenergian varastointitekniikoita älykkäässä sähköverkossa. Työ on tehty Metropolia Ammattikorkeakoululle.

Työssä vastataan muun muassa seuraaviin kysymyksiin: Mitä älykäs sähköverkko tarkoittaa? Miten sähkön varastointi liittyy älykkääseen sähköverkkoon? Millaisia sähköenergian varastointitekniikoita on käytössä? Mitä lupaavia varastointitekniikoita on kehitteillä? Mitkä ovat niiden hyödyt ja haitat? Lisäksi työssä arvioidaan eri sähkövarastojen roolia älykkäässä sähköverkossa sekä niiden roolia Suomessa tulevaisuudessa. Työssä arvioidaan myös tarvittavan energiavarastoinnin määrää Suomessa ja maailmalla.

2 Älykäs sähköverkko

Älykkäälle sähköverkolle ei ole yksiselitteistä määritelmää. Kuitenkin sähköverkolle, jolla saavutetaan tulevaisuuden ympäristövaatimukset ja käyttöön liittyvät tavoitteet, on alettu käyttää yleisnimitystä älykäs sähköverkko eli *smart grid*. Älykkäällä sähköverkolla voidaan tarkoittaa esimerkiksi seuraavanlaista sähköverkkoa:

Tulevaisuuden tarpeita tyydyttäviä sähkönjakeluverkkoja, joiden tehokkuutta, luotettavuutta ja joustavuutta on kehitetty automaatio-, tieto- ja viestintätekniologialla, ja jossa kuluttajat osallistuvat nykyistä enemmän sähkömarkkinoiden toimintaan kaksisuuntaisen tiedonkulun kautta. Älykäs sähköverkko tukee lisääntyvästi hajautetun, uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun energian jakelua sekä uusia sähkön varastointitekniikoita. [1, s. 9.]

Tulevaisuudessa sähköä tuotetaan nykyistä enemmän uusiutuvalla sähköntuotannolla sekä hajautetulla tuotannolla. EU:n tavoitteena on saada jäsenmaiden energiankulutuksesta 20 % uusiutuvista lähteistä vuoteen 2020 mennessä. Tämä edellyttää

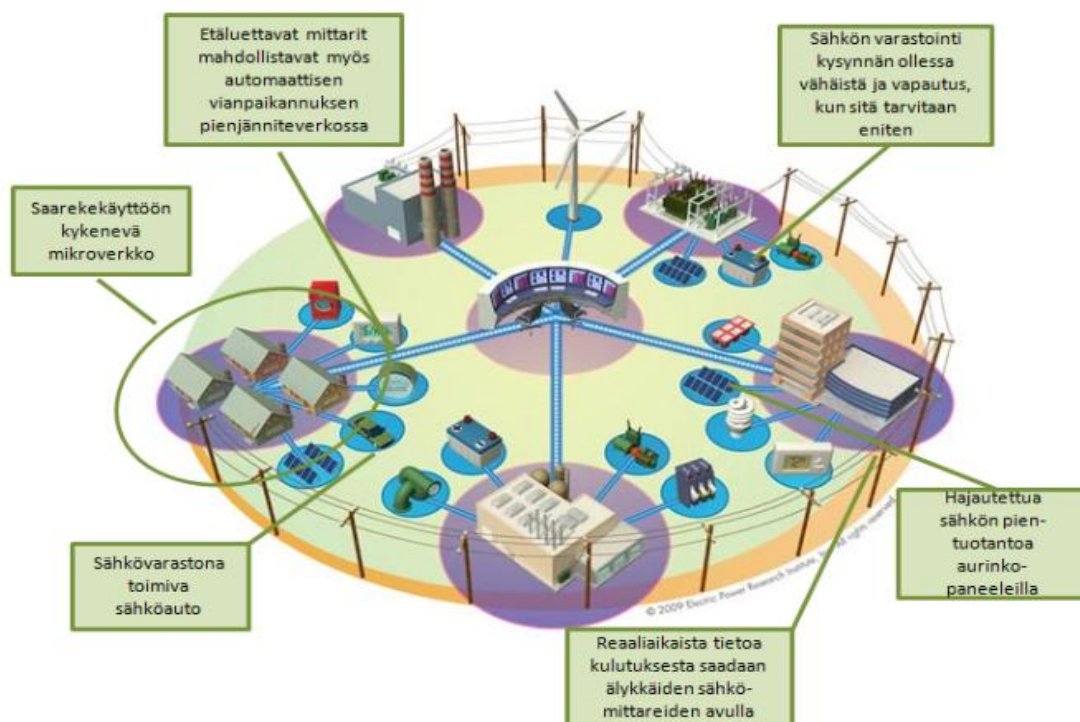
sähköverkolta uudenlaista joustavuutta, jota nykyisellä sähköverkolla ei ole. Perinteisessä sähköverkossa sähkö kulkee vain yhteen suuntaan eli sähkön tuotantolaitoksista loppukuluttajille. Tulevaisuuden älykkäissä sähköverkoissa tieto ja sähkö kulkevat kulutuspiesteestä kahteen suuntaan, kun loppukuluttajat voivat toimia myös tuottajina. Tämä tarkoittaa nykyistä hajautetumpaa sähkön tuotantoa, esimerkiksi kuluttajan omaa aurinko- tai tuulivoimaa. Aktiivisessa jakeluverkossa kuluttajat ja tuottajat olisivat linkittyneet yhteen, jolloin molempien osallistuminen sähkömarkkinoille olisi mahdollista. Kuluttajilla olisi siis nykyistä aktiivisempi rooli sähkömarkkinoilla. Nämä asiat mahdollistavat uudenlaisia palveluita sekä sähkön kuluttajille että tuottajille.

Tulevaisuudessa älykkäässä sähköverkossa voitaisiin tuottaa, kuluttaa, siirtää ja varastoida sähköä. Älykäs sähköverkko voisi myös toimia pienempinä mikroverkkoina, jotka kykenisivät saarekekäyttöön, jolloin saarekkeet voisivat toimia vikatilanteissa itsenäisesti. Älykkäässä sähköverkossa voidaan myös ohjata kuluttajien käyttäytymistä kysyntäjoustopuun avulla. Kuluttajat hyötyvät taloudellisesti, jos he toimivat järjestelmän tasapainon hyväksi eli käyttävät sähköä silloin, kun on ylitarjontaa, ja vähentävät kulutustaan, kun tarjontaa on vähän.

Älykäs sähköverkko on myös huomattavasti perinteistä sähköverkkoa ekologisempi, kun uusiutuvien energianlähteiden määrä lisätään. Esimerkiksi kuluttajien kodit voisivat olla yhteydessä sähköverkkoon siten, että ne säätäisivät itse itsensä energiatehokkaiksi ja kuluttajat voisivat tuottaa osan energiastaan pienimuotoisilla hajautetuilla uusiutuvilla energianlähteillä.

Kaiken kaikkiaan älykäs sähköverkko toimii nykyistä sähköverkkoa tehokkaammin. Jotta tämä olisi mahdollista, vaaditaan uudenlaisen tekniikan liittämistä osaksi sähköverkkoa. Kuitenkin suurin osa tarvittavista teknisistä komponenteista ja teknologioista on jo olemassa. Suurin ongelma onkin nykyisissä ohjausjärjestelmissä olevat puutteet ja suuret investointikustannukset.

Kuva 1 (ks. seur. s.) esittää tulevaisuuden visioita älykkään sähköverkon toiminnoista. Kuvassa 1 esitetään sähkön varastointia, uusiutuvia energianlähteiden käyttöä, hajautettua energian tuotantoa, kysyntäjoustopuun mahdollistamia älykkäitä mittausjärjestelmiä sekä saarekekäyttöön kykeneviä mikroverkoja. [1, s. 8 - 10; 2; 3; 4.]



Kuva 1. Älykkään sähköverkon osa-alueita yksinkertaistettuna [1, s.10]

3 Sähkön varastointi älykkäässä sähköverkossa

Sähkön varastoinnilla on suuri merkitys älykkäässä sähköverkossa. Tulevaisuuden älykkäissä sähköverkoissa sähköä tuotetaan huomattavasti nykyistä enemmän hajautetulla tuotannolla sekä uusiutuvilla energianlähteillä kuten aurinko- ja tuulivoimalla. Uusiutuvilla energianlähteillä tuotettu energia on luontaisesti vaihtelevaa, ja tämän takia sähkön tuotanto ei ole yhtä tasaista kuin nykyään. Siksi verkon täytyy kyetä reagoimaan epätasaisen tuotannon aiheuttamiin ongelmiin nopeasti, mikä olisi mahdollista sähkön varastoinnilla.

Energian varastointia käytettäisiin tulevaisuudessa epätasaisen tuotannon ja verkon kuormien tasaukseen, reservitehoon sekä katkottomaan sähkönjakeluun. Sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen välillä täytyy vallita tasapaino. Jos on ylituotantoa, sähkön taajuus alkaa nousta. Jos taas kulutus on suurempaa kuin

tuotanto, taajuus alkaa laskea. Koska aurinko- ja tuulivoima eivät ole tasaisia, vaan riippuvaisia säästä, ilman sähkön varastointia syntyisi edellä mainittua tuotannon ja kulutuksen epäsuhtaa. Sähkövarastoilla voitaisiin energia varastoida tuotannon huippujen aikana ja siirtää varastoitu energia sähköverkkoon alhaisen tuotannon aikana, jolloin energiaa ei menisi hukkaan. Sähkövarastoilla voidaan myös tuottaa energiaa kulutushuippuihin, jolloin sähkön hinta on korkea.

Voidaankin sanoa, että sähkön varastointi on avain uusiutuvan energian tuotannon lisäämiseen. Sähkön varastointi hajatuotannossa olisi myös olennainen osa älykästä sähköverkkoa. Koska tulevaisuudessa monilla kuluttajilla olisi omaa pientuotantoa kuten aurinko-paneeleita, voitaisiin tämä energia tarvittaessa varastoida ja käyttää myöhemmin omaan käyttöön tai myydä verkkoon.

Tässä tärkeässä osassa ovat sähköautot, joiden akkuja voitaisiin käyttää sähkön varastoinnissa. Pientuotannon ja sähköautojen akkuja hyödyntämällä voitaisiin myös luoda mikroverkkoja, joilla voitaisiin torjua paremmin vikatilanteita ja parantaa sähköverkon luotettavuutta. Jotta tällainen järjestelmä olisi mahdollinen, se vaatisi sähkön varastointiteknologioiden lisäämistä sähköverkon eri kohtiin aina tuotannon alkupäästä kuluttajille asti.

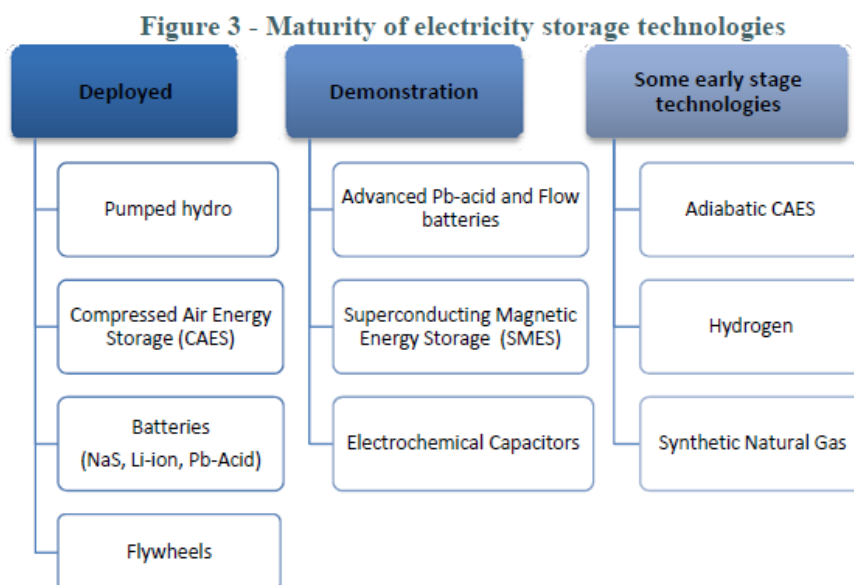
Erilaisilla sähkön varastointiteknologioilla olisi eri tehtäviä älykkäässä sähköverkossa ja tulevaisuuden haasteena onkin eri varastointiteknologioiden valitseminen ja toteuttaminen parhaalla mahdollisella tavalla. Suureen sähkön kysyntään soveltuvat pumppuvoimalaitokset ja paineilmaparastot. Muita varastointiteknologioita ovat erityyppiset akut, magneettiset energiavarastot, superkondensaattorit ja vauhtipyörät sekä sähköautot. Sähkön varastointi sähköverkossa on vielä melko harvinaista teknisten ja taloudellisten ongelmien vuoksi. Tulevaisuudessa ne kuitenkin tarjoavat hyvän mahdollisuuden parantaa sähköverkon ja tuotannon joustavuutta. [2; 5, s. 85, 113; 4.]

4 Sähköenergian varastointiteknologiat

Tässä luvussa perehdytään sellaisiin sähkön varastointiteknologioihin, joita voidaan hyödyntää tulevaisuuden älykkäissä sähköverkoissa. Jokaisella työssä esitettävällä

teknologialla on oma ominaisuutensa, joka tekee siitä soveliaan toimiakseen osana toimivaa älykästä sähköverkkoa. Näitä energiavarastoja voitaisiin käyttää sähköverkossa monissa eri sovelluksissa ja käyttötarpeissa.

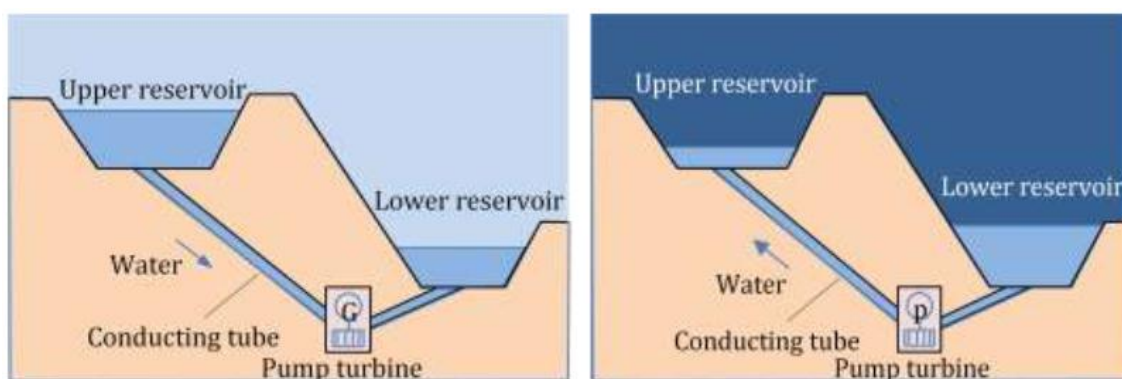
Nykyisin sähköä voidaan joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta varastoida vasta sen jälkeen, kun sähköenergia on muutettu toiseen muotoon kuten potentiaalienergiaksi. Sähkön muuntaminen toiseen muotoon ei ole kuitenkaan ongelmaton, sillä se vaatii kalliita rakennelmia ja prosesseja, joissa syntyy häviöitä. Uusia varastointimenetelmiä kehitetään kuitenkin koko ajan, vaikka kehitystyö on hidasta. Tulevaisuudessa materiaalitekniikan halventuessa monet varastointitekniikat tulevat potentiaalisemmiksi ja niitä voidaan hyödyntää älykkäässä sähköverkossa. Kuvassa 2 nähdään erityyppisiä jo käytössä olevia sekä vasta kehitteillä olevia varastointitekniikoita. Älykkäässä sähköverkossa tarvitaan uudenlaisia tekniikoita, joihin vanhat tekniikat kuten dieselgeneraattorit eivät sovellu. [5, s. 86; 6, s. 16.]



Kuva 2. Yleiskatsaus erilaisista sähkön varastointitekniikoista, joita voidaan käyttää sähköverkossa [6, s.16]

4.1 Pumppuvoimalaitokset

Pumppuvoimalaitoksen eli PHS (*Pumped Hydro Storage*) toiminta perustuu pumpatun veden potentiaalienergiaan. Pumppuvoimalaitoksessa vesi pumpataan halvan sähkön aikana matalammalla sijaitsevasta altaasta korkeammalla olevaan altaaseen silloin, kun kulutus on vähäistä. Kun sähkön tarve on suuri ja sähkön hinta korkeampi, vesi juoksetetaan takaisin alempana sijaitsevaan altaaseen. Tällöin vesi pyörittää turbiinia, joka pyörittää sähkögeneraattoria, joka puolestaan tuottaa sähköä. Kuvasta 3 voidaan havaita pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaate.

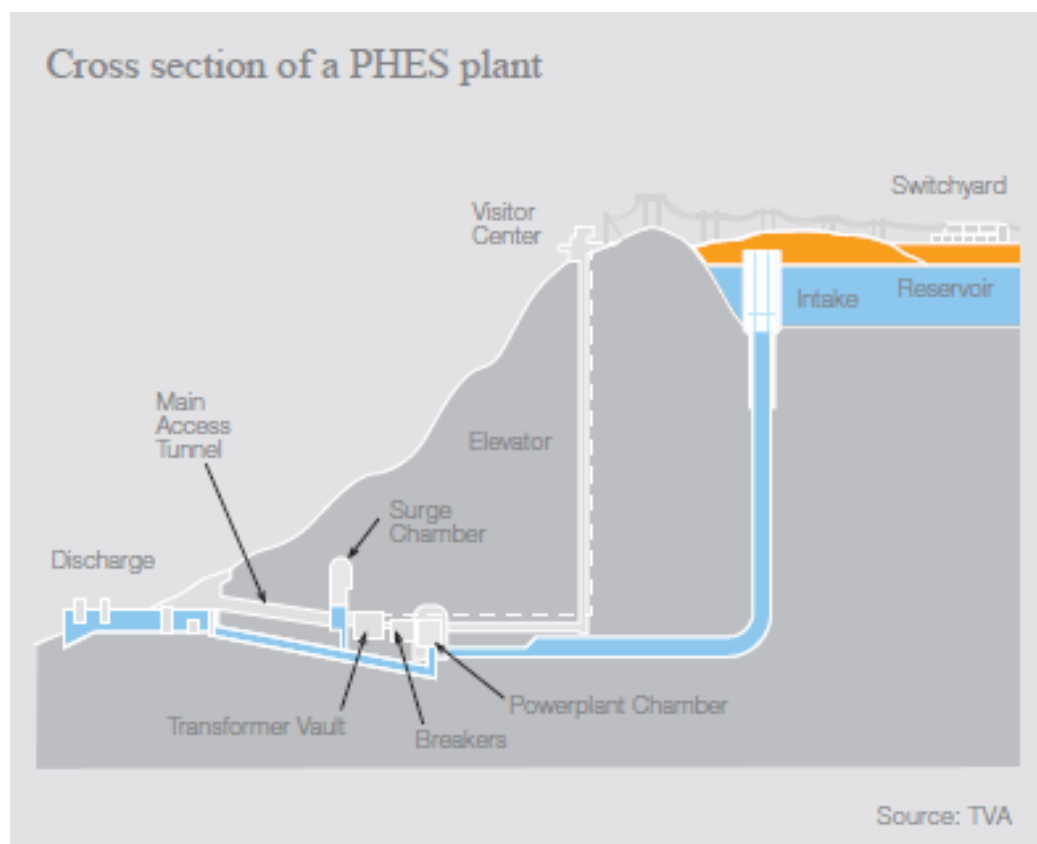


Kuva 3. Pumppuvoimalaitoksen toimintaperiaate [7, s. 43].

Pumppuvoimalaitos on siis energiavarasto, jossa veden potentiaalienergia muutetaan sähköenergiaksi. Varastoidun energian määrään vaikuttavat pumpatun veden tilavuus sekä veden pumppauskorkeus. Vaikka pumppuvoimalaitoksen täytyykin ottaa sähköä verkosta pyörittääkseen pumppuja, se on kannattavaa, koska voimalaitos pystyy asettamaan korkeamman hinnan tuottamalleen sähkölle. Mitä suurempi on sähkön hinnan vuorokauden välinen vaihtelu, sitä kannattavampi pumppuvoimalaitos on.

Pumppuvoimalaitokset ovat ylivoimaisesti käytetyin sähkön varastointitekniikka. Arviolta 99 % maailman sähköverkkoihin yhdistetyistä energiavarastoista on pumppuvoimalaitoksia ja maailmalla pumpattua vesivoimaa on käytössä yli 100 GW. Pohjoismaista ainoastaan Norjassa ja Ruotsissa on sähkömarkkinoilla pumppuvoimaa. Suurimmat pumppuvoimalaitokset ovat 1 000 MW - 3 000 MW. Kapasiteetti riippuu siitä, ovatko vesivarastot luonnonmukaisia vai rakennettuja. Pumppuvoimalaitoksen varastointikapasiteetti on yleensä noin vuorokausi kun kyseessä on rakennettu

vesiallas. Luonnollisissa vesialtaissa varastointikapasiteetti voi olla jopa 1 - 2 vuotta. Kuvasta 4 nähdään pumppuvoimalaitoksen läpileikkaus. [8, s. 3; 9;10.]



Kuva 4. Pumppuvoimalaitoksen läpileikkaus [11, s.11].

Sähköverkossa pumppuvoimalaitoksia käytetään yleensä varavoimana. Pumppuvoimalaitoksia voidaan käyttää myös energian pitkäaikaiseen varastointiin, loistehon kompensointiin sekä nopeisiin säätötarpeisiin tilanteissa, joissa verkossa tapahtuu jokin häiriö ja esimerkiksi taajuus alkaa heilahdella. [12, s. 45.]

Pumppuvoimalaitoksen etuja ovat sen suuri tehon tuottokyky ja energian varastointimahdollisuus. Sillä on pitkä elinikä, noin 40 vuotta, sekä nopea käyttömahdollisuus varavoimana. Pumppuvoimalaitokset ovatkin tehokkain sähkön varastointitapa ja niiden hyötysuhde on yleensä 70 - 80 %. Esimerkiksi Yhdysvaltojen suurin pumppuvoimalaitos pystyy varastoimaan 9.1 GWh. Heikkouksia ovat pumppuvoimalaitoksen mahdollistavat luonnollisten korkeuserojen vähyys ja niiden sijainti. Putouskorkeudet vaihtelevat 200 - 1500 m:in. Maailmanlaajuisesti pumppuvoimalaitokset ovat hyvä mahdollisuus verkon säätötarpeisiin, mutta

Suomessa vähäisten korkeuserojen esiintyminen on ongelmallista. Kuva 5 havainnollistaa pumppuvoimalaitoksen todellista kokoa. [5, s. 86; 7, s. 43 - 44; 8, s. 3;11, s. 11; 12, s. 45.]



Kuva 5. Pumppuvoimalaitos Limbergissä Itävallassa [13, s. 15]

4.2 Paineilmavarastot

Paineilmavarasto eli CAES (engl. *Compressed Air Energy Storage*) on sähkön varastointiteknologia, joka käyttää korkeaan paineeseen puristettua ilmaa energiavarastona. Paineilmavarasto toimii siten, että ilma puristetaan kovaan paineeseen yön aikana, kun sähkön hinta pienemmän kulutuksen takia on edullisempaa. Vastaavasti paineilmavarasto puretaan, kun kulutus on suuri ja hinta korkea.

Kuva 6 (ks. s. 10) havainnollistaa paineilmavaraston toimintaa. Ilma puristetaan sille tarkoitettuun varastoon, joihin suuren luokan paineilmavarastoissa voivat toimia esimerkiksi vanhat kaivokset tai luonnonmukaiset muodostelmat kuten suolakivi- tai

suolavesiesiintymät. Paineilmavarasto voidaan rakentaa myös maan päälle, jolloin ilman varastona toimii metallista valmistettu säiliö. Edellä mainituista tavoista suolavesiesiintymät ovat kaikkein edullisimpia.

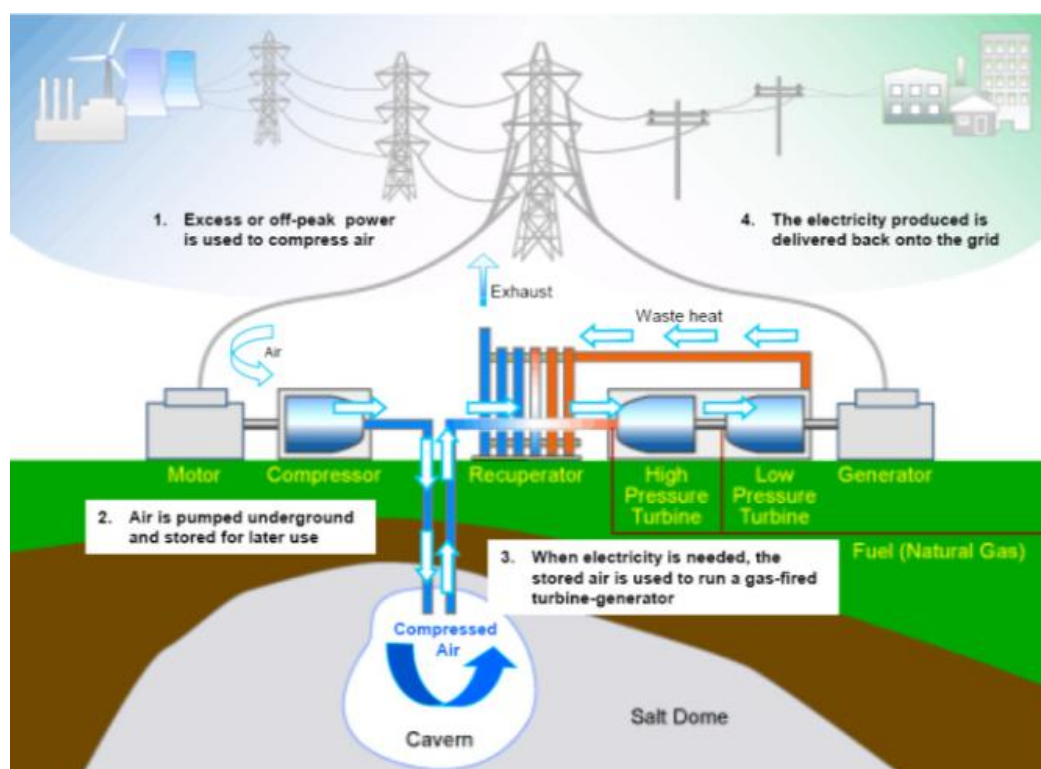
Kun sähkön tarve on suurempi ja hinta kasvaa yösähköä korkeammaksi, voidaan ilma vapauttaa varastosta, jolloin se virtaa sähkögeneraattoria pyörittävän turbiinin läpi. Ilman virratessa turbiiniin ilma lämmitetään. Tällöin ilma laajenee ja pyörittää tehokkaasti turbiinia. Näin paineilmavarastolla tuotettu sähkö tuottaa voittoa hyödyntämällä sähkön hinnan heilahtelua samaan tapaan kuin pumppuvoimalaitoksessa. Paineilmavarasto on yleisesti käytetty sähköenergian varastointimenetelmä. Paineilmavarastot soveltuvat hyvin suuren luokan energian hallintaan. Sen etuina ovat suuri energian varastointikyky, noin 100 - 300 MW, ja nopea käynnistysaika, noin 14 minuuttia, sekä pidempi elinikä kuin akuilla. Esimerkiksi Saksassa Huntorfissa toimiva paineilmavarasto on toiminut menestyksellisesti jo yli 20 vuotta.

Paineilmavaraston yksi heikkous on sen matala hyötysuhde, joka voi olla alle 70 %. Hyötysuhde määräytyy siitä, voidaanko ilman paineistusvaiheessa syntynyttä lämpöä hyödyntää. AA-CAES (engl. *Advanced Adiabatic-CAES*) on kehitteillä oleva paineilmavoimala, jossa paineistettaessa syntyvä lämpö varastoitaisiin erilliseen varastoon, jolloin erillistä energian lähdettä, kuten kaasua ei tarvittaisi ilman lämmittämiseen. Tämä teknologia on kuitenkin vielä kehitysasteella, ja siinä on tiettyjä ongelmia kuten tehokkaan lämmönvarastointijärjestelmän kehittäminen ja kuuman ilman käsittely.

Kehitteillä on myös toinen paineilmavoimala, jossa hyödynnetään veden painetta. Siinä ilma puristetaan edullisen sähkön aikaan veden alla sijaitseviin joustaviin varastoihin. Kun sähkön tarve kasvaa, ilma vapautetaan, ja veden paine puristaa ilman ulos. Tässäkin teknologiassa paineistettaessa syntynyt lämpö voitaisiin varastoida erilliseen varastoon ja hyödyntää myöhemmässä vaiheessa, kun ilma ohjataan turbiiniin.

Toinen heikkous on paineilmavaraston vaatima kaasu, jolla se kuumentaa ja laajentaa ilman, jotta turbiini saadaan pyörimään tehokkaasti. Kuitenkin paineilmavarasto käyttää 40 % vähemmän kaasua polttoaineena saman sähköenergian määrän tuottamiseen kuin perinteinen kaasuturbiini. Kolmas heikkous liittyy geologiseen ympäristöön. Jotta paineilmavarasto olisi mahdollista toteuttaa, se vaatisi ympäristöltä tietynlaista edellä

mainittua geologista ominaisuutta. Jos tällaista ympäristöä ei luonnostaan esiinny, on suuren ilmavaraston rakentaminen maan päälle kallista, arviolta noin viisi kertaa niin kallista kuin maan alle rakennettavan paineilmmavaraston rakentaminen. Paineilmavarastoja on asennettuna 400 MW, josta 290 MW on asennettuna Saksaan ja 110 MW USA:han. [7, s. 57 - 61; 8, s. 3 - 5; 11, s.10; 12, s. 44; 14, s. 13 - 14.]



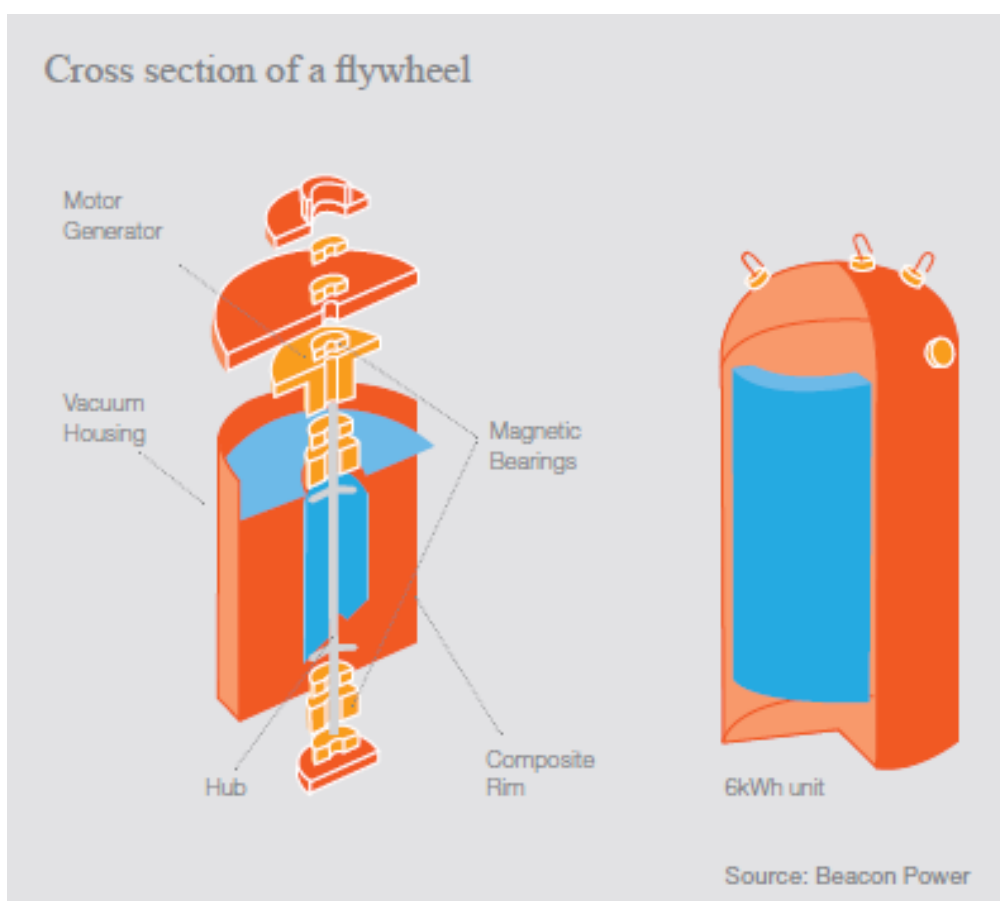
Kuva 6. Paineilmavaraston toimintaperiaate [15, s. 4]

4.3 Vauhtipyörä

Vauhtipyörän toimivuus perustuu siihen, että sähköenergiaa voidaan muuttaa liike-energiaksi ja toisinpäin. Vauhtipyörä voidaan siis kiihdyttää haluttuun pyörimisnopeuteen sähköverkosta otetulla sähköenergialla, jolloin vauhtipyörä varastoi tämän energian liike-energiaksi. Kun sähköenergia on muutettu liike-energiaksi, se voidaan muuttaa helposti takaisin sähköenergiaksi haluttaessa.

Vauhtipyörä koostuu kuvan 7 mukaisesti:

- roottorista, joka pyörii ja toimii energiavarastona
- moottori-generaattorista, jolla roottori saadaan pyörimään ja vastaavasti liike-energia voidaan purkaa sähköksi
- laakereista, joiden tehtävä on luonnollisesti kitkan vähentäminen
- suojakuoresta, joka suojaa mahdollisissa vikatilanteissa syntyviltä sirpaleilta.

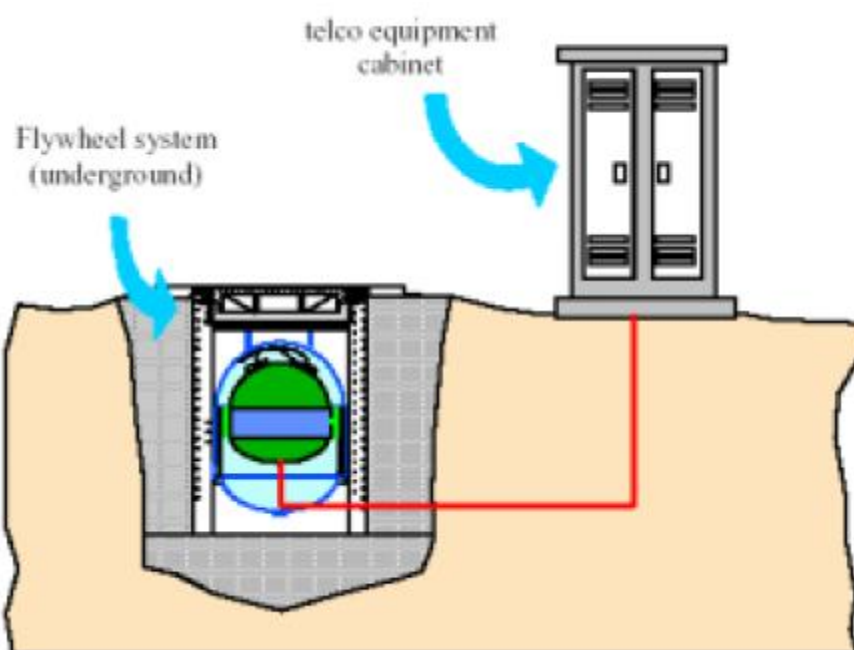


Kuva 7. Vauhtipyörän läpileikkaus [11, s. 13]

Vauhtipyöriä on erityyppisiä ja niiden etuja ovat nopea reagointiaika, hiljainen käyttööni, vähäiset huoltovaatimukset ja tehokkuus sähkön laadun ylläpidossa. Lisäksi vauhtipyörän voi ladata ja purkaa loputtomiin eikä sen varastointikyky heikkene

ajan kuluessa toisin kuin akuilla. Etuina ovat myös pitkä elinikä sekä se, että vauhtipyörän sisältämä energia voidaan purkaa täysin tyhjäksi.

Heikkoutena vauhtipyörällä on sen korkea hinta, joka muodostuu erittäin tarkoista komponenteista sekä suurista suojakuoren rakenteista. Vauhtipyörät joudutaankin usein sijoittamaan haja-asutusalueelle tai maan alle turvallisuussyistä. Kuvassa 8 on esimerkki vauhtipyörän sijoittamisesta maan alle.



Kuva 8. Vauhtipyörän sijoittaminen maan alle [12, s. 75]

Toinen heikkous on roottorin muuttuva pyörimisnopeus, joka alkaa laskea heti, kun pyörittäminen lopetetaan, ja näin siitä saatava sähköenergia ei pysy vakiona. Vauhtipyörän hyötysuhde on noin 85 %, ja sillä voidaan tuottaa useiden megawattien suuruinen teho. Vauhtipyörät soveltuvat hyvin esimerkiksi jännitepiikkien tasaukseen niiden lyhyiden vasteaikojen vuoksi tai lyhytaikaiseksi varavoimaksi sekä taajuuden säätöön. Niitä voidaan käyttää tuulivoiman tukena erityisesti pienissä sähköverkoissa. [8, s. 5; 11, s. 13; 14, s.15 - 19.]

4.4 Akut

Akku on sähkökemiallinen varasto ja se voidaan ladata uudelleen. Perinteisen akun perustoimintaperiaate perustuu hapettumis-pelkistymisreaktioon. Akku siis varastoi sähköä sähkökemialliseen muotoon, jonka se muuttaa sähköksi akkua purettaessa. Kun akkua ladataan, se muuttaa sähköisen energian taas kemialliseksi energiaksi. Akkuteknologiat eroavat toisistaan pääosin elektrodien materiaalien ja elektrolyyttiaineen mukaan. Tässä insinööriyössä perehdytään sellaisiin akkuihin, joita voidaan käyttää osana sähköverkkoa ja sähköjärjestelmää. [5, s. 90; 8, s. 11, 2.]

Akkuja voidaan liittää yhteen akkuvarastoiksi, joilla voi tulevaisuudessa olla useita käyttösovelluksia kuten uusiutuvan energian varastointi sekä taajuuden ja jännitteen säätö. Akkuja voitaisiin käyttää useissa verkon eri osissa kuten pienjännite-, keskijännite- ja suurjänniteverkoissa. Taulukosta 1 (ks. seur. s.) nähdään erilaisten akkujen soveltuvuuksia eri jännitetasoihin.

Etuina akkujen käytössä sähkövarastona ovat niiden modulaarinen rakenne ja nopea vasteaika. Näiden ominaisuuksien takia akut soveltuvat hyvin taajuuden säätöön ja useaan eri jännitetasoon liittymiseen. Potentiaalisimpia akkuja tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen sähköjärjestelmässä ovat litiumakku ja natriumakku. Erilaisia uusia akkutyyppejä kehitetään jatkuvasti lisää. Akkujen kehitystyö on kuitenkin hidasta koska niiden käyttöönottotestit saattavat kestää jopa monia vuosia. Akut tarjoavat kuitenkin paljon potentiaalia tulevaisuudessa, kun materiaaliteknologian myötä akkujen kustannukset alenevat ja suorituskyky paranee. [5, s. 90; 8, s. 17 - 18.]

Taulukko 1. Erialaisten sähkövarastojen soveltuvuus eri jännitetasoihin [8, s.10]

varastointi- teknologia	varasto- tyyppi	teho- luokka	jännite- taso			
			siirto- verkko	jakelu- verkko		
				si/kj	kj	pj
sähkökemialliset akut	lyijy Akku	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

4.5 Litiumakut

Litiumioniakussa Li-ion (engl. *Lithium-ion*) litiumionit kulkevat anodilta katodille elektrolyytissä akkua purettaessa. Litiumioniakkuja on monia erityyppisiä ja niiden kustannukset, ominaisuudet ja turvallisuus eroavat toisistaan valitun katodimateriaalin mukaan. Litiumakkuja on käytetty perinteisesti pienemmissä sovelluksissa kuten sähköautoissa. Sähköverkossa litiumakkuja voidaan käyttää taajuuden säätämiseen, jännitteen säätämiseen sekä uusiutuvan energian varastointiin. Jotta litiumakkuja voitaisiin käyttää sähköverkossa yleisesti, edellyttäisi se turvallisen ja riittävän edullisen ratkaisun löytämistä. Pääongelma tähän mennessä ison luokan akuissa on ollut niiden korkea hinta, yli 600 USD/kW.

Litiumioniakkujen etuina ovat niiden äärimmäisen korkea energiatiheys, kyky sietää useampia purkukertoja kuin millään muulla akulla sekä korkea hyötysuhde. Heikkouksina ovat korkea hinta, ylilatauksen ja alilatauksen negatiivinen vaikutus sekä mahdollinen ylikuumentuminen ja räjähtäminen varsinkin lämpimässä ympäristössä.

Litiumakut saattavat myös olla tulevaisuudessa sähköautojen johtava energianlähde. Tällöin niiden kustannukset voivat laskea merkittävästi. Sähköautoissa hyödynnettävät litiumakut saattavat olla kuitenkin ominaisuuksiltaan sellaisia, että ne eivät sovellu käytettäväksi sähköverkossa. [5, s. 90; 8, s. 13; 11, s. 7.]

4.6 Natriumrikkiakut

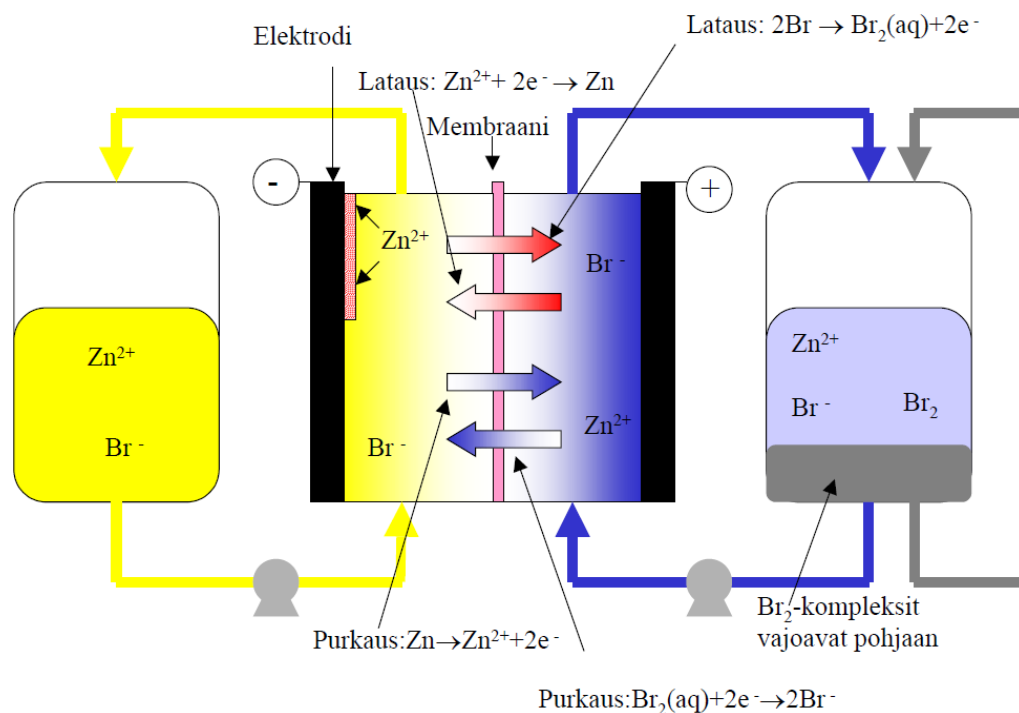
Natriumrikkiakut NaS (engl. *Sodium Sulfur Battery*) sisältävät sulassa olomuodossa olevaa natriumia (Na) ja rikkiä (S). Natriumrikkiakkujen toiminta perustuu natriumrikkireaktioon, ja ne vaativat toimiakseen korkeita lämpötiloja (300 - 350 °C). Ne soveltuvat hyvin suuremman luokan sovelluksiin kuten tuuli- ja aurinkoenergialla tuotetun sähkön varastointiin.

Natriumrikkiakun etuina ovat sen korkea energiatiheys, pitkä elinikä, nopea reaktioaika sekä se, että se voidaan ladata ja purkaa useaan kertaan. Heikkouksia ovat akun vaatima korkea lämpötila sekä turvallisuus.

Maailmanlaajuisesti natriumrikkiakkuja on käytössä yli 300 verkkosovelluksessa, joista pääosa on Japanissa. Natriumrikkiakkuja voidaan käyttää sähköverkossa useaan eri käyttötarkoitukseen kuten sähkön laadun ylläpitämiseen, verkon tasapainon säilyttämiseen sekä uusiutuvan energian varastointiin. [5, s. 90; 11, s. 4.]

4.7 Virtausakut

Virtausakuissa energia varastoidaan kahteen nestemäiseen elektrolyyttiin, joista toinen on varautunut negatiivinen ja toinen positiivinen. Virtausakut voidaan jaotella kahteen pääryhmään redox- ja hybridivirtausakkuihin. Nimitys virtausakku tulee siitä, että elektrolyyttiä kierrätetään kennon ja varastointisäiliön välillä. Kuva 9 havainnollistaa virtausakun rakennetta.



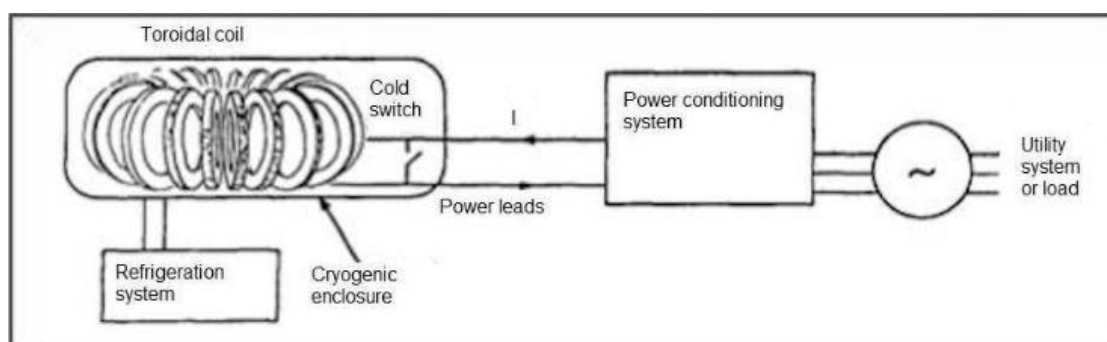
Kuva 9. Sinkki-bromidi-virtausakun toimintaperiaate [12, s. 65]

Virtausakkuja voidaan käyttää useissa eri sovelluksissa verkossa kuten verkon kuormien tasaamisessa, varavoimana ja aurinko- ja tuulivoiman varastoisissa. Etuina virtausakuissa ovat pitkä elinikä ja nopea vasteaika. Heikkouksina ovat matala energiatiheys verrattuna natriumrikkiakkuun ja litiumioniakkuun ja se, että virtausakkuja ei ole vielä kovin paljon tuotettu kaupallisesti. Virtausakkuja on kuitenkin jo alettu käyttää sähköverkossa. Esimerkiksi Afrikassa Tasmaniassa oli vuonna 2003 - 2008 noin 200 kW:n sovellus tuulienergian varastoisimiseen. [5, s. 90; 8, s. 12; 11, s. 5.]

4.8 Suprajohtava magneettinen energiavarasto

Suprajohtavassa magneettisessa energiavarastossa, SMES:ssä (engl. *Superconducting magnetic energy storage*) hyödynnetään suprajohtavuutta. Siinä virtaa otetaan sähköverkosta, minkä jälkeen se muunnetaan tasavirraksi ja varastoidaan suprajohtavan käämin magneettikenttään kuten kuva 11 havainnollistaa (ks. s. 18). Koska käämi on suprajohtava, energia voidaan varastoida pitkiksi ajoiksi ilman suurta energiahäviötä. Suprajohtavan magneettisen energiavaraston ideana on, että se varataan, kun kulutus on pientä, ja sähkön hinta on alhainen. Kun kulutus kasvaa, energia puretaan takaisin sähköverkkoon. [14, s. 10.]

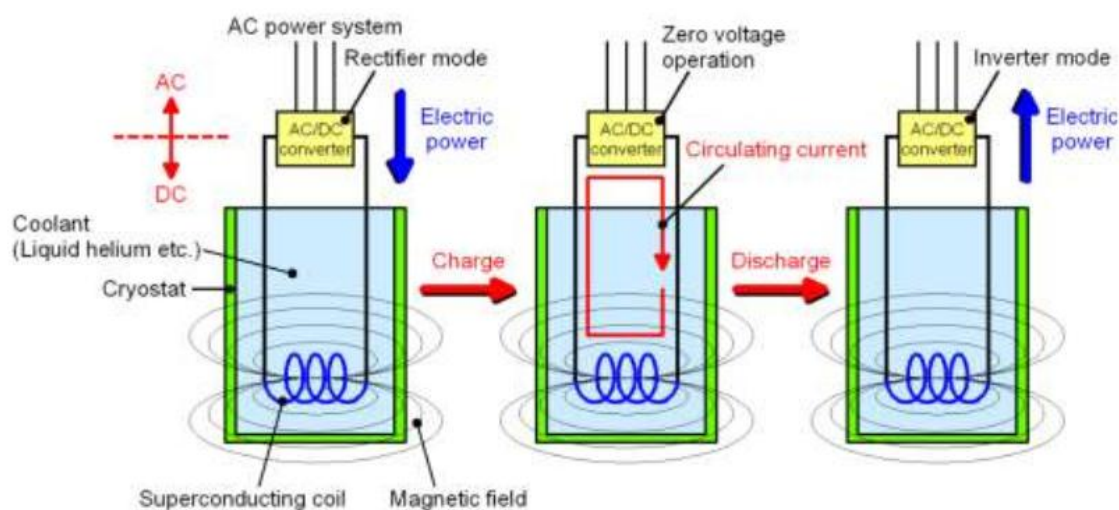
SMES:n etuina ovat nopea vasteaika, nopea latausaika ja pitkä syklinen elinikä. SMES:ssä voidaan vapauttaa suuri määrä energiaa hyvin nopeasti ja sen hyötysuhde on korkea, yli 95 %. Heikkouksina ovat pieni energiatiheys, korkea hinta sekä sen ympärillä oleva magneettikenttä. Magneettikenttää voidaan kuitenkin ehkäistä sijoittamalla SMES maan alle tai koteloidamalla se. [11, s. 15; 5, s. 91.]



Kuva 10. Suprajohtava magneettinen energiavarasto [14, s. 11]

SMES koostuu yksinkertaistaen neljästä osasta, joita kuva 10 havainnollisti. Nämä osat ovat suprajohtava magneetti, jäähdytysjärjestelmä, ohjausjärjestelmä sekä muuntojärjestelmä. Yleisin aine, jota käytetään suprajohteissa, on niobititaani (NbTi), joka täytyy jäähdyttää $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Juuri jäähdytys muodostaa suuren osan SMES:n kustannuksista, noin 15 %. Jäähdyttäminen vaatii paljon energiaa ja aikaa. [9, s. 15; 14, s. 11.]

Suprajohtavia magneettisia energiavarastoja voidaan käyttää sähköverkossa eripituisten häiriöiden ja vaihteluiden tasoittamiseen kuten sähkön laadun ylläpitämiseen ja taajuuden säätelyyn. Suurimpia SMES:jä voidaan käyttää tasapainottamaan energian tuotantoa ja kulutusta vuorokausitasolla. USA:ssa on arviolta 30 SMES-järjestelmää ja niiden kapasiteetti on noin 50 MW. Tyypillisesti SMES-järjestelmät ovat olleet kooltaan 10 - 100 MW. Nyt on alettu kehittää myös pienempiä 1 - 10 MW:n laitteita. Korkeiden jäähdytyskustannusten takia SMES ei ole kuitenkaan vielä kovin yleinen. Joissakin visioissa on suunniteltu 5000 - 10000 MWh:n laitoksia. Tällaiset laitokset olisivat todella suuria, sillä solenoidin halkaisija olisi kilometrin luokkaa ja rakennuskustannukset 1 - 2 biljoonaa dollaria. Kun tulevaisuudessa matalammassa lämpötilassa toimivien suprajohteiden hinnat alenevat, SMES:n käyttö voi sähköverkossa yleistyä. [11, s. 15; 12, s. 75 - 78; 14, s. 12 - 13.]



Kuva 11. SMES-järjestelmän toimintaperiaate [7, s. 72].

4.9 Superkondensaattorit

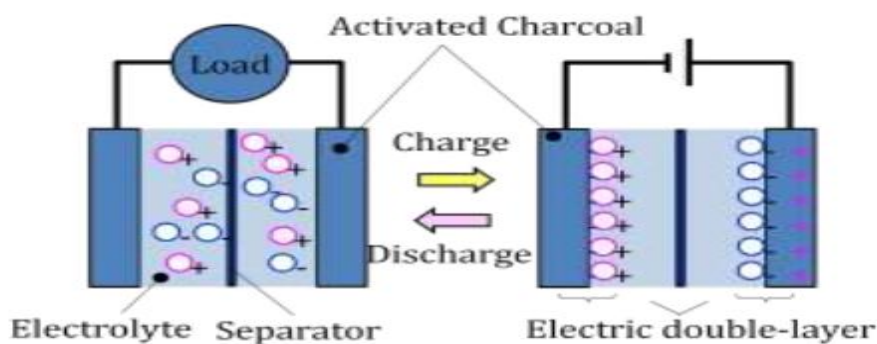
Superkondensaattorin toimintaperiaate on samantapainen kuin akun tai tavallisen kondensaattorin toimintaperiaate. Superkondensaattori varastoi energian elektrostaattiseksi energiaksi ja siinä, toisin kuin tavallisessa kondensaattorissa, on kaksi sähkökenttää. Superkondensaattori pystyy varastoimaan 500 000 kertaa suuremman kapasitanssin kuin tavallinen kondensaattori. Superkondensaattorissa elektrodien välissä on ioneja läpi päästävä erotinkalvo, jonka molemmille puolille syntyy vastakkaisuuntaiset sähkökentät. Kuva 12 (ks. seur. s.) havainnollistaa superkondensaattorin toimintaperiaatetta. [5, s. 91; 8, s. 5; 14, s. 8 - 9.]

Superkondensaattorit voidaan jakaa kahteen ryhmään, joihin kuuluvat sähkökemialliset kaksoiskerrossuperkondensaattorit (engl. *electrochemical double layer supercapacitors*, ECDL) ja pseudokondensaattorit [14, s. 9].

Superkondensaattoreiden etuja ovat niiden todella nopea purkausaika, pitkä syklinen ikä sekä vähäinen herkkyys ylilataukselle. Heikkouksina ovat matala energiatiheys ja kallis hinta. [11, s. 16.]

Superkondensaattoreita voidaan hyödyntää sellaisissa sovelluksissa, joissa vaaditaan nopeaa latausta ja purkausnopeutta, huoltovapautta ja pitkää elinikää. Tällainen kohde

sähköverkossa on esimerkiksi taajuuden säätö. Superkondensaattoreita on kuitenkin vielä melko vähän käytössä sähköverkossa. Esimerkiksi Havajilla on käytössä 500 kW:n superkondensaattori tuulivoimalan yhteydessä, jonka tarkoitus on säätää taajuutta tehon vaihteluissa. [11, s. 16; 14, s. 9.]



Kuva 12. Superkondensaattorin toimintaperiaate [7, s.61]

4.10 Varastointiteknologioiden vertailu

Energiavarastojen vertailu ei ole yksinkertaista, sillä sopivimman sovelluksen valinta riippuu aina käyttötarkoituksesta. Energiavarastoja voidaan kuitenkin vertailla keskenään niiden erilaisten ominaisuuksien mukaan. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa:

Varastointiominaisuudet

- varastointikapasiteetti (kWh)
- energiatiheys (kWh/kg)
- tehotiheys (kW/kg)
- lataus- ja purkunopeus (kW)
- hyötysuhde (%).

Toiminnalliset ominaisuudet

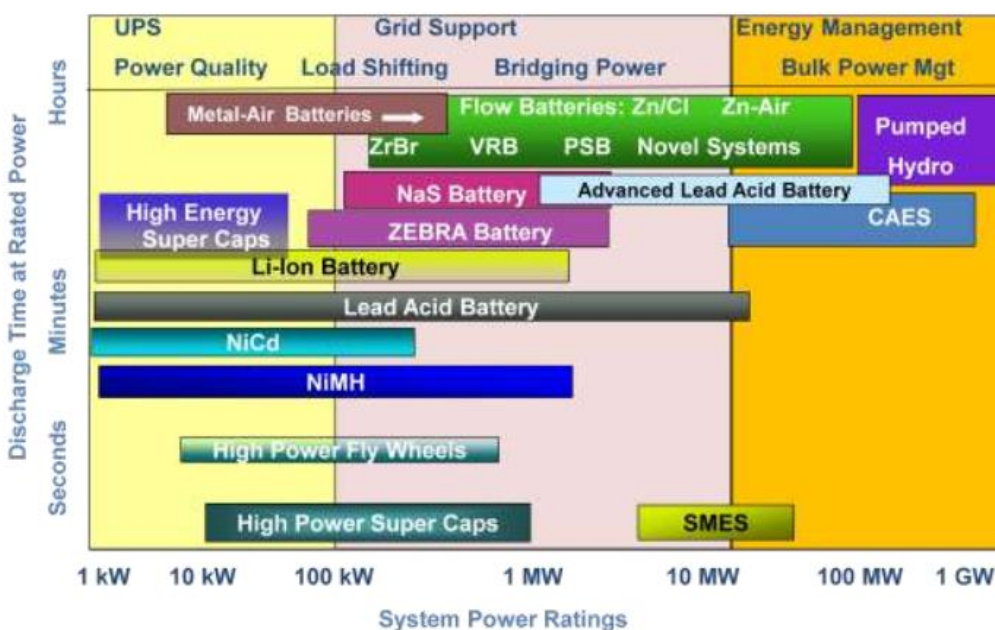
- vasteaika eli aika, joka vaaditaan ennen kuin varastoidusta energia- muodosta saadaan sähköä kulutukseen

- pysäytysaika
- käyttöikä eli vuosien tai latauskertojen määrä, jonka ajan teknologiaa voidaan hyödyntää
- luotettavuus.

Muut ominaisuudet

- turvallisuus
- sijainti
- investointikustannukset sekä teknologialla tuotetun energian hinta
- takaisinmaksuaika. [5, s. 86; 7, s. 19.]

Kuvassa 13 vertaillaan eri varastointitekniikoita keskenään. Siinä vertaillaan eri varastointitekniikoiden purkuajoja suhteessa tehoon sekä esitetään eri tekniikoiden soveltuvuutta eri tehtäviin verkossa.



Kuva 13. Eri varastointitekniikoiden vertailu keskenään [7, s. 19]

Kuvasta 13 voitiin havaita, että pumppuvoimalaitokset ja paineilmalaitokset pystyvät varaamaan suurimman määrän energiaa, ja niiden purkuajat ovat melko pitkiä, tunteja

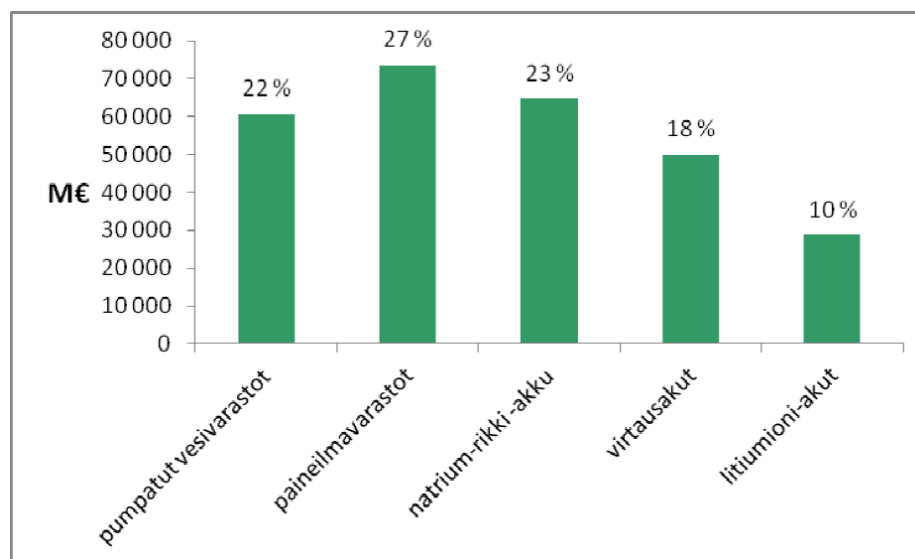
tai enemmän. SMES ja superkondensaattorit pystyvät nopeimmin vapauttamaan suuren määrän energiaa. Erityyppiset akut sijoittuvat ominaisuuksiltaan edellä mainittujen teknologioiden väliin. Paras valinta eri sovelluksiin riippuu käyttötarkoituksesta ja maan yksilöllisistä tarpeista.

Todellisuudessa pelkästään varastointiominaisuudet ja toiminnalliset ominaisuudet eivät riitä, jos teknologian taloudellinen käyttö ei ole mielekästä. Liitteen 1 taulukossa esitetään eri energiavarastoilla tuotetun energian ja tehon hintoja.

Varastointiteknologian investointikustannukset ja sillä tuotetun energian hinta sekä takaisinmaksu ovat tärkeä kriteeri arvioitaessa sopivimman teknologian valintaa. Liitteestä 1 nähdään, että pumppuvoimalaitoksen hinta on 60 - 150 €/kWh, CAES:in 10 - 120 €/kWh, vauhtipyörän 1000 - 3500 €/kWh, SMES:in 700 - 7000 €/kWh ja superkondensaattoreiden 300 - 4000 €/ kWh. Erityyppisistä akkuista Li-ion-akkujen hinta on 200 -1800 €/kWh, NaS-akkujen 200 - 900 €/kWh ja virtausakkujen tyypistä riippuen 100 - 1000 €/kWh.

Yllä olevan mukaisesti pumppuvoimalaitos ja CAES ovat nykyisin vielä edullisin tapa varastoida sähköenergiaa. Edes NaS-akut eivät ole yhtä edullisia, vaikka ne ominaisuuksiensa vuoksi sopisivatkin hyvin suurten tehojen varastointiin. Akkujen ominaisuudet sopivat kuitenkin hyvin taajuuden säätöön, sillä säätö tapahtuu erittäin nopeasti. Akkuista voidaan siirtää sähköä verkkoon ja niihin voidaan ladata sähköä nopeasti, jolloin niitä voidaan käyttää ylös- ja alas-säätöön. Tämän takia niistä voidaankin saada kaksi kertaa enemmän säätötehoa kuin perinteisistä säätötavoista.

Myös akkujen rakenne soveltuu hyvin niiden käyttöön eri jännitetasoissa, koska ne ovat pienikokoisia eivätkä vaadi erityistä ympäristöä. Li-ion-akkujen hinnat saattavat pudota tulevaisuudessa varsinkin, jos niistä tulee johtava teknologia sähköautojen energianlähteenä. Toisaalta niiden ominaisuudet eivät välttämättä sovellu suurten tehojen varastointiin. Boston Consulting Groupin tekemässä tutkimuksessa on ennustettu eri energiavarastojen kumulatiivinen markkinapotentiaali vuonna 2030. Kuva 14 esittää tilanteen kaaviona. Kuvasta nähdään, että akkujen markkinaosuudet voivat olla lähes samansuuruisia mekaanisten varastointimuotojen kanssa tulevaisuudessa. [8, s. 33 - 40; 7, s. 34.]



Kuva 14. Eri energiavarastojen kumulatiivinen markkinapotentiaali vuonna 2030 [8, s. 33]

Myös SMES on vielä nykyisin kallis tapa varastoida sähköä. Se on kuitenkin hyvin tehokas energian tuottaja, kuten myös superkondensaattori ja vauhtipyörä. SMES:in hinta saattaa laskea tulevaisuudessa, mikäli suprajosteiden hinnat laskevat. Tällöin SMES voi tarjota erittäin paljon potentiaalia sähkön varastointiin, koska SMES:ssä sähköenergiaa ei tarvitse muuttaa toiseen muotoon. Superkondensaattoreilla ja vauhtipyörillä sähköenergian varastointi on kallista, mutta ne soveltuvatkin hyvin lyhytkestoisiin sovelluksiin, joissa vaaditaan nopeaa reagointiaikaa. [7, s. 34 - 35; 8, s. 33 - 40.]

5 Energiavarastojen sijoittuminen ja niiden tehtävät eri sovelluskohteissa älykkäässä sähköverkossa

Tässä osiossa perehdytään energiavarastojen sijoitukseen älykkäässä sähköverkossa sekä niiden olennaisimpiin tehtäviin siinä. Tarkoituksena on perehtyä sellaisiin tehtäviin, jotka ovat ominaisia juuri älykkäälle sähköverkolle. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa uusiutuvien energianlähteiden laaja käyttömahdollisuus, hajautetun tuotannon hallinta, mikroverkkojen mahdollistaminen, sähköautojen rooli, sähkön siirto useaan suuntaan ja kuluttajien energianvarastointi.

Älykäs sähköverkko kokonaisuutena on useiden eri asioiden summa, ja erilaisilla varastointiteknologioilla on tärkeä rooli älykkäässä sähköverkossa kuten aikaisemmin

tässä insinööriyössä on ilmennyt. Sähkön varastointitekniologiat kuten pumppuvoimalaitokset, paineilmaparastot, vauhtipyörät, erityyppiset akut, superkondensaattorit ja magneettiset varastot ovat tulevaisuudessa monessa eri tehtävässä ja sovelluksessa sähköverkossa. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi VTT:n tutkimuksen mukaan:

- Sähkönjakeluverkon stabiilius sekä hajautetun ja uusiutuvan tuotannon hallinta
 - aurinkoenergian ja tuulienergian optimaalisen hyödyntämisen ja saarekekäytön edellytys on tehokas energian varastointitekniologian käyttö sekä tuotannon tasauksen, katkosten että sähkön laadun hallinnassa
 - tuotannoltaan luontaisesti vaihtelevaa uusiutuvista lähteistä tuotettua energiaa voidaan tasata käyttämällä tuotannon huippuja lataukseen ja alentuneen tuotannon ja katkosten aikana siirtää varastoitua energiaa verkkoon
 - lisäenergiaa voidaan tuottaa kuormitusten kulutushuippuihin, jolloin energian hinta on tyypillisesti korkeampi.
- Sähkön syötön varmistus
 - sähkön laadun hallinta; UPS (Uninterruptible Power Supply) on järjestelmä tai laite, jonka tehtävä on taata tasainen virransyöttö lyhyissä katkoksissa ja syöttöjännitteen epätasaisuuksissa. UPS liitetään virtalähteen ja virtaa käyttävän laitteen (esimerkiksi tietokoneen) väliin
 - hätä-back-up-sovellukset, verkon jännitteen hallinta kuormitushuippujen aikana.
- Tehon ja kuormien hallinta
 - tehotarpeet vaihtelevat kilowateista satoihin megawatteihin riippuen siitä, onko sovelluskohde kuluttaja-, jakelu- vai siirtoverkon tasolla, älykkäiden verkkojen osalta varastointitekniologiat keskittyvät kuluttaja- ja jakeluverkkoihin
- Kuljetus (ajoneuvot) ja liikuteltavat laitteet
 - sähköajoneuvot ovat energiavarastojen yksi keskeisimmistä sovelluskohteista
 - sähköautojen käyttäminen huippuajan kysynnän vastaamiseksi. [1, s. 54.]

Kuitenkaan kaikki sähkön varastointitekniologiat eivät sovi kaikkiin eri sovelluksiin sähköverkossa. Tämän takia sopivimpien sähkövarastojen löytäminen eri sähköverkkosovelluksiin ei ole täysin yksinkertaista. Sähkön varastointitekniologian valinta riippuu muun muassa järjestelmän koosta, tarpeesta ja energianlähteistä. Edellä esitettyjä sähkön varastointitekniologioita voidaan sijoittaa laajasti ympäri sähköverkkoa eri jännitetasoihin, jolloin ne parantavat sähköverkon kantavuutta, luotettavuutta, joustavuutta ja turvallisuutta. Taulukko 2 (ks. seur. s.) havainnollistaa, millaisiin eri sovelluksiin sähkön varastointia voidaan käyttää sähköverkossa. [5, s. 85.]

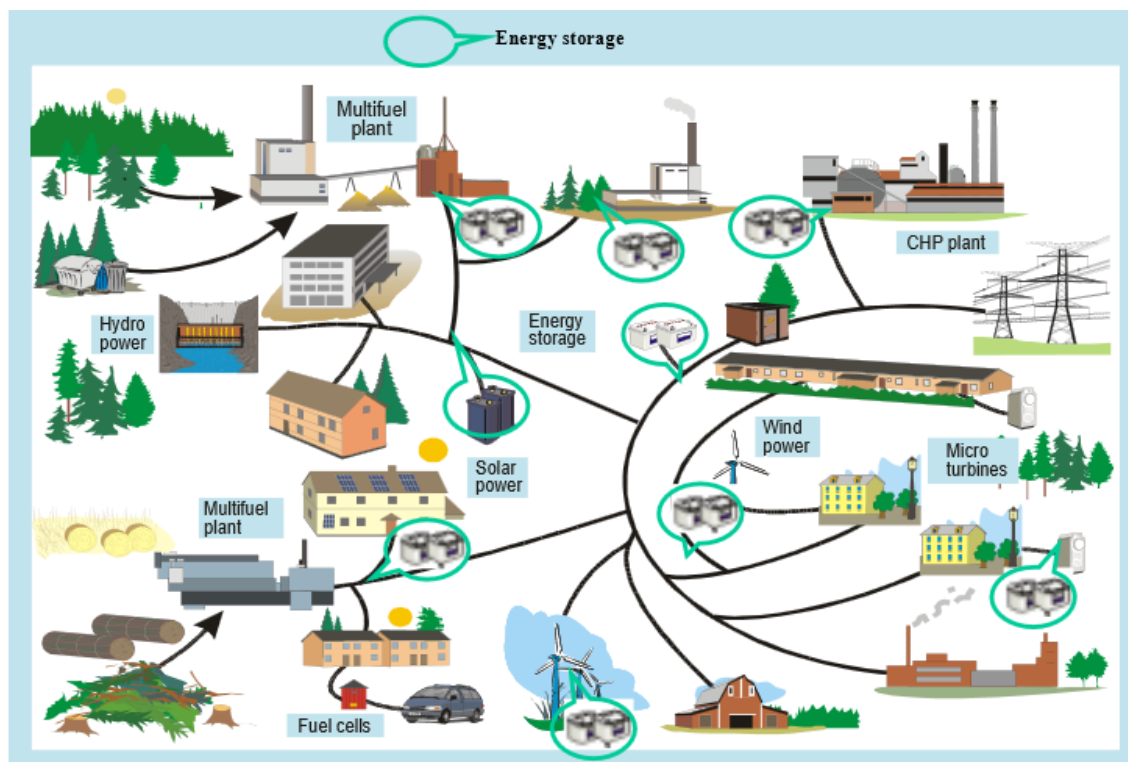
Taulukko 2. Sähkövarastojen tehtäviä sähköverkossa [6, s. 21]

Bulk Energy Services	
Electric Energy Time-Shift (Arbitrage)	
Electric Supply Capacity	
Ancillary Services	
Regulation	
Spinning, Non-Spinning and Supplemental Reserves	
Voltage Support	
Black Start	
Other Related Uses	
	Transmission Infrastructure Services
	Transmission Upgrade Deferral
	Transmission Congestion Relief
	Distribution Infrastructure Services
	Distribution Upgrade Deferral
	Voltage Support
	Customer Energy Management Services
	Power Quality
	Power Reliability
	Retail Electric Energy Time-Shift
	Demand Charge Management

5.1 Sähkövarastojen sijoitus älykkäässä sähköverkossa

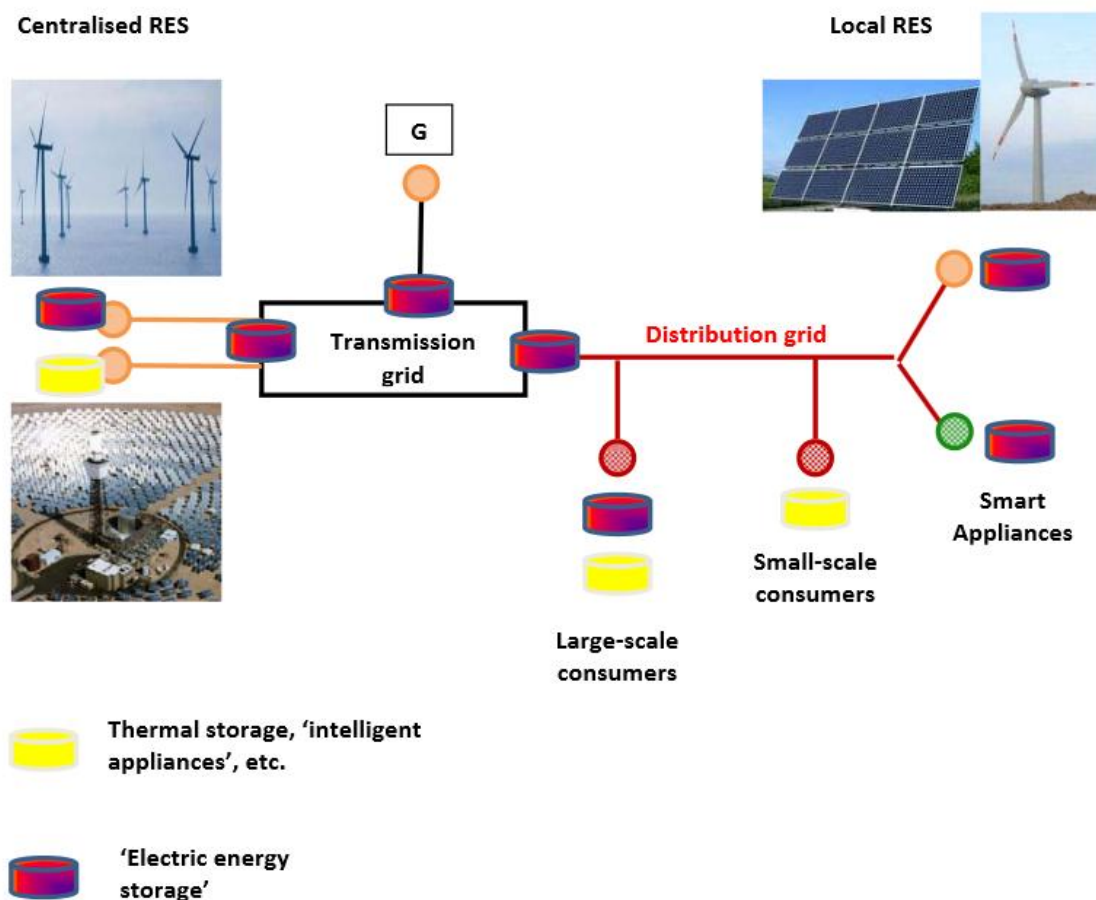
Sähkövarastoja voidaan sijoittaa älykkään sähköverkon kaikkiin osiin eli tuotantoon, sähkön siirtoon ja jakeluun sekä kuluttajien käyttöön. Sähkövarastojen sijoitus sähköverkkoon riippuu siitä, minkälaisiin tehtäviin niitä on tarkoitus käyttää. Sähkön tuotannossa sähkövarastojen tehtäviä ovat muun muassa kulutuksen ja tuotannon taseus ja varavoima. Sähkön siirrossa tehtäviä ovat esimerkiksi taajuuden säätö ja sähköverkon laajennuksen välttäminen. Sähkön jakelussa varastointia voidaan käyttää esimerkiksi jännitteen säätöön ja lisäkapasiteetiksi tarvittaessa. Järjestelmät osaavat vastata automaattisesti sähköverkon tarpeisiin älykkään viestinnän avulla.

Kuluttajan tasolla sähkövarastoja voidaan käyttää muun muassa piikkien tasaamiseen sekä omalla tuotannolla tuotetun sähkön varastoimiseen ja siirtämiseen verkkoon. Kuvat 15 ja 16 (ks. s. 25 - 26) havainnollistavat energiavarastojen sijoitusta ekologiseen älykkääseen sähköverkkoon, jossa on hajautettua tuotantoa.



Kuva 15. Hajautettua tuotantoa ja energiavaroja [12, s. 91]

Suuren mittakaavan sähkövarastoiksi soveltuvat pumppuvoimalaitokset, paineilmavarastot, lämpövarastot ja vetyvarastot. Näillä teknologioilla tehot ovat jopa GW:en luokkaa. Ne soveltuvat suuren kokoluokan energian hallintaan tuotannon alkupäähän. Sähkön siirtoon soveltuvat erilaiset akut kuten litiumakut, virtausakut ja natriumakut. Sähkön siirtoon voidaan sijoittaa superkondensaattoreita, magneettisia energiavaroja ja vauhtipyöriä. Nämä sovellukset ovat MW:en luokkaa. Kuluttajien tasoon sekä sähköjakelun yhteyteen voidaan sijoittaa pienempiä kW:n sovelluksia kuten litium- ja lyijyakkuja ja superkondensaattoreita sekä vauhtipyöriä. Sähköautojen akuilla olisi tärkeä tehtävä sähkövarastona toimimisessa. Näitä teknologioita yhdessä käyttämällä voidaan muodostaa älykäs sähköverkko, joka toimii ekologisesti, tehokkaasti ja luotettavasti. [13, s. 6 - 7.]



Kuva 16. Energiavarastojen sijoitus älykkääseen sähköverkkoon [13, s. 6]

5.2 Energiavarastojen merkitys tuuli- ja aurinkoenergian laajan käytön mahdollistamisessa

Yksi varastoinnin tärkeimmistä tehtävistä tulevaisuudessa on tuuli- ja aurinkoenergian aiheuttaman tehon epätasaisuuden pienentäminen. Aurinko- ja tuulivoima ovat riippuvaisia sääolosuhteista. Tämä tekee niistä epätasaisia energiantuottajia. Myös älykkäissä sähköverkoissa yleinen hajautettu energian tuotanto on epätasaista. Sähköverkossa täytyy vallita tasapaino tuotannon ja kulutuksen suhteen, muutoin sähkön taajuus joko kasvaa tai laskee.

Lyhytaikaiset, sekuntien ja minuuttien mittaiset tehonheilahtelut aiheuttavat poikkeamia taajuudessa. Suomessa sähköverkon nimellistaajuus on 50 Hz ja Pohjoismaissa taajuuden sallitaan vaihtelevan 49,9 Hz:n ja 50,1 Hz:n välillä. Verkkotaajuuden ylläpito

toteutetaan järjestelmäreserveillä ja säätösähkömarkkinoiden avulla. Järjestelmäreservit voidaan jakaa käyttötarkoituksen mukaan kolmeen eri tyyppiin. Nämä ovat taajuuden vakautusreservit, palautusreservit sekä korvaavat reservit. Vakautusreservit ovat käytettävissä korkeintaan kolmen minuutin viiveellä, palautusreservit 15 minuutin aikana ja korvaavat reservit otetaan käyttöön, jos muut reservityypit ovat jo käytössä. [8, s. 23.]

Pidempiaikaiset, tuntien mittaiset tehonmuutokset aiheuttavat vaikeuksia sähkön myynnissä. Vieläkin pidemmät päivien ja kuukausien mittaiset heilahtelut vaikuttavat vakaaseen tuotantoon. Näihin tehon vaihteluihin voidaan käyttää sähkövarastoja varavoimana ja säätövoimana. Tuntien mittaiset ja pidemmät tehon vaihtelut ovat melko hyvin ennustettavissa, koska ne riippuvat täysin sääolosuhteista. Tämän takia ne voidaan ehkä kompensoida muilla keinoilla kuin energiavarastoilla. Lyhyempiaikaiset tehon vaihtelut ovat vaikeampia ennustaa ja sen takia ne ovat ongelmallisia sähkön taajuuden stabiiliuden kannalta. Koska energiavarastoilla on nopea reagointi-aika, pystyvät ne säätämään vaihteluita nopeasti. Taulukko 3 (ks. seur. s.) esittää energiavarastojen tehtäviä ja ominaisuuksia sähköverkon stabiilisoinnissa ja hajautetussa tuotannossa.

Energian lataukseen voidaan käyttää tuotannon huippuja, kun tuottaminen on edullista eikä kulutuksen tarve ole suuri. Alentuneen tuotannon ja katkosten aikana energia siirretään takaisin verkkoon ja sähkön laatu pystytään pitämään hyvänä. Kun sähkö voidaan varastoida tilanteissa, joissa kulutuksen vaatima sähköenergian määrä on jo saavutettu, ei ylimääräinen energia mene hukkaan. [1, s. 53; 8, s. 22.]

Taulukko 3. Energiavarastojen tehtäviä ja ominaisuuksia sähköverkon stabilisoinnissa ja hajautetussa tuotannossa [12, s. 92]

Sovellus	Teho	Varas- tointiaika	Energia kWh	Vasteaika	Teknologia
Siirron ja jakelun stabilointi	jopa satoja MW	sekunteja	20–50	<1/4 sykli	SMES***) H ₂ polttokenno Lyijyakku
Hajautettu jakelu (huippukuormat)	0,5–5 MW	~1 h	5 000–50000	<1 min	Vauhtipyörä Kehittyneet akut, lyijyakku SMES Polttokenno tai -moottori CAS*)
Loppukäyttäjän huippukuormien hallinta (kustannusten väh.)	<1 MW	~1h	1 000	<1 min	Vauhtipyörä Kehittyneet akut, lyijyakku SMES Polttokenno tai -moottori CAS
Uusiutuvien energialähteiden tuotannon tasaus	–10 MW	min – 1 h	10–10 000	<1 sykli	Vauhtipyörä Kehittyneet akut, lyijyakku H ₂ polttokenno SMES
Uusiutuvien back-up	100 kW – 1 MW	– 7 päivää	20–200	sekunteja – minuutteja	Kehittyneet akut, lyijyakku CAES**), CAS Pumpattu vesivoima H ₂ polttokenno ja maan- alainen varasto
*)CAS (Compressed Air Storage), **)CAES (Compressed Air Energy Storage) ***)SMES (Superconducting magnetic energy storage)					

5.3 Mikroverkot ja saarekekäyttö

Tulevaisuuden visioita älykkäälle sähköverkolle ovat mikroverkot, jotka kykenevät saarekeverkkokäyttöön.

Mikroverkko on tarvittaessa itsenäiseen saarekekäyttöön kykenevä, paikallista tuotantoa ja kulutusta sisältävä pienjännitejakeluverkon osa, johon kuuluu myös yksi tai useampi energiavarasto. [1, s. 42.]

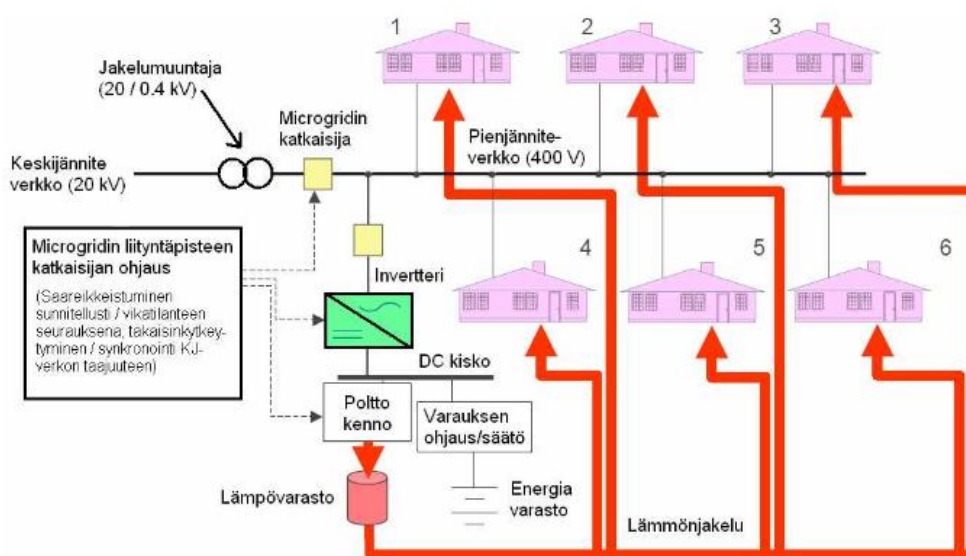
Perusajatuksena mikroverkossa on sähkön laadun ja luotettavuuden parantaminen ja hajautetun tuotannon mahdollistaminen. Kuva 17 (ks. seur. s.) havainnollistaa mikroverkon toimintaa.

Koko jakeluverkko voisi olla rakentunut pienemmistä saarekkeista eli mikroverkoista, jotka vian sattuessa voisivat toimia itsenäisinä verkkoina. Ongelmana kuitenkin on, että mikroverkkojen saarekekäyttö edellyttää erittäin nopeaa tuotannon ja kulutuksen yhteensovittamista. Saarekekäyttö tarkoittaa sitä, että voimajärjestelmä on jaettu eri

tahdissa käyviin pienempiin osiin, jotka toimivat itsenäisenä kokonaisuutena erillään valtakunnallisesta verkosta. Jos tällaisen saarekeverkon energia tuotetaan uusiutuvilla energianlähteillä, voidaan niiden aiheuttama tehon heilahtelu kompensoida energiavarojen avulla. Tämä on erityisen tärkeää saarekeverkoissa, koska toisin kuin jäykässä sähköverkossa pienetkin kuormituksen muutokset vaikuttavat jännite-tasoon ja taajuuteen merkittävästi.

Energiavarojen avulla voidaan toteuttaa saarekeverkkojärjestelmä, joka koostuu pelkästään uusiutuvista energianlähteistä. Saarekeverkko voitaisiin esimerkiksi toteuttaa siten, että tuulipuiston yhteyteen asennettaisiin energiavaro, jolloin se pystyisi vielä syöttämään energiaa, vaikka tuuli tyyntyisikin.

Energiavaroja voidaan myös liittää keskijännitelinjaan, jossa ne yleisesti tasapainot-taisivat energian tuotantoa ja kulutusta. Esimerkiksi lyhyet katkokset ja uusiutuvan energian aiheuttamat tehon heilahtelut voidaan hoitaa superkondensaattoreilla ja pidempiaikaiset akuilla. Energiavaro voi liittää lähelle kuluttajia. Tähän voitaisiin käyttää esimerkiksi sähköautojen akkuja tai asuntojen yhteydessä olevia akkuja. Asuntoihin voitaisiin liittää omia pientuotantomuotoja kuten aurinkokennoja. Tällöin voitaisiin päästä tilanteeseen, jossa taloudet olisivat hetkittäin omavaraisia. [1, s. 42; 8, s. 26; 16, s. 45; 17, s. 3 ja 15 - 16.]



Kuva 17. Yksinkertaisen mikroverkon periaatekuva [18, s. 50]

5.4 Energiavarastojen merkitys sähkön laadussa

Älykkään sähköverkon yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on se, että se pystyy toimimaan perinteistä sähköverkkoa luotettavammin. Energiavarastoilla on tärkeä rooli sähkön laadun ylläpitämisessä hyvänä varsinkin tulevaisuudessa, jolloin käytetään huomattavasti nykyistä enemmän uusiutuvia energianlähteitä sekä hajautettua tuotantoa. Sähkön laadulla tarkoitetaan useaa eri asiaa. Laatu voi tarkoittaa esimerkiksi sähkön fyysisiä ominaisuuksia kuten taajuuden ja jännitteen suuruutta, sinimuotoisuutta ja yliaaltopitoisuutta. Myös keskeytymätön sähkön jakelu kuuluu sähkön laatuun.

Kuten on havaittu, voidaan sähkövarastoja sijoittaa verkon jokaiseen jännitetasoon. Näitä sähkövarastoja keskenään käyttämällä voidaan saavuttaa sähköverkko, jossa sähkön laatu pysyy hyvänä. Sähkövarastoilla voidaan parantaa sähkön laatua säätämällä taajuutta ja jännitettä. Esimerkiksi useat eri akkuteknologiat sekä magneettiset sähkövarastot, superkondensaattorit ja vauhtipyörät soveltuvat tähän. Sähkövarastojen avulla voidaan myös taata keskeytymätön sähkön jakelu käyttämällä niitä varavoimana. Myös kuluttajat ovat tulevaisuudessa nykyistä omavaraisempia energian tuotannon suhteen ja älykkäässä sähköverkossa kuluttajilla on omia sähkövarastoja kuten sähköautojen akkuja, joita voidaan hyödyntää vikatilanteissa. [8, s. 24.]

5.5 Sähköautojen merkitys älykkäässä sähköverkossa

Sähköautoilla on tulevaisuuden visioissa merkittävä rooli älykkäässä sähköverkossa. Sähköautojen akkuja voitaisiin käyttää energiavarastoina hajautetun tuotannon yhteydessä. Kuluttajat voisivat varastoida omalla tuotannolla tuotettua sähköä ja siirtää sitä verkkoon tarvittaessa tai käyttää itse esimerkiksi häiriötilanteissa. Sähköautoja voitaisiin käyttää myös säätökäytössä.

Koska autot ovat suurimman osan päivästä verkkoon kytkettyinä, voitaisiin niitä silloin käyttää sähkövarastoina. Jos esimerkiksi autoja olisi miljoona, voitaisiin niistä saada jopa 20 GWh:n suuruinen varasto. Autojen ollessa latauspisteissä voitaisiin niistä älykkäiden mittareiden ja ohjausjärjestelmien avulla siirtää sähköä verkkoon. Akut

voitaisiin käyttää myös jossain määrin uusiutuvilla tuotetun sähkön varastointiin ylituotantotilanteissa.

Akkujen lataus voisi tapahtua yöllä, kun kuluttajat ovat nukkumassa. Tämä ei kuitenkaan ole ongelmatonta, koska aurinko- ja tuulivoima ovat voimakkaampia päivällä. Toinen ongelma on se, että akkuja purettaessa niitä ei voida purkaa tyhjiksi, koska muutoin autoa ei voisi aina käyttää tarvittaessa. Ongelmana on myös se, että akkuja purettaessa usein niiden elinikä lyhenee. Nämä ongelmat voitaisiin osittain ratkaista sillä, että sähköautojen määrä olisi tarpeeksi suuri, jolloin yksittäisen auton kapasiteettiä ei tarvitsisi kuormittaa liikaa. Akkujen eliniän lyheneminen pitäisi taas korvata kuluttajille sähköauton hinnassa tai muilla keinoin.

Ympäristötavoitteet painostavat puhtaamman liikenteen hyödyntämiseen. Euroopan Unioni on asettanut tavoitteen, että vuonna 2050 koko liikenteen päästöjen tulisi olla 60 % vähäisemmät verrattuna vuoteen 1990. Jotta sähköautoja voitaisiin hyödyntää kunnolla, ja jotta sähköautojen samanaikainen lataus onnistuisi, vaatisi se kehittyneen latausjärjestelmän, mutta kehitys vie aikaa. Tästä syystä käytetään todennäköisesti muita varastointitapoja aluksi. [5, s. 94 - 95; 8, s. 27.]

5.6 Kuluttajien omat sähkövarastot ja niiden rooli hajautetussa energiantuotannossa ja sähkön siirrossa

Tulevaisuuden visioissa energiaa tuottavat perinteisten voimalaitosten lisäksi pienkuluttajat, teollisuus ja liike-elämä. Tarkoituksena on käyttää nykyistä enemmän pienimuotoista, uusiutuvilla energianlähteillä hajautetusti tuotettua energiaa. Tämä mahdollistaa kuluttajan aktiivisen roolin sähkömarkkinoilla. Kuluttajat voisivat käyttää sähköautojen akkuja itse tuotetun energian varastointiin ja myydä tarvittaessa sähköä eteenpäin sähköverkkoon. Näin sähkö liikkuisi älykkäässä sähköverkossa kahteen suuntaan sähköverkosta kuluttajille ja toisinpäin.

6 Sähkön varastointi sekä tulevaisuuden tarpeet globaalisti ja Suomessa

Tässä osiossa perehdytään energiavarastoinnin tarpeeseen ja eri teknologioiden käyttöön Suomessa ja maailmalla. Osiossa pohditaan muun muassa sitä, minkälaisia energiavarastoja voidaan soveltaa Suomessa ja maailmalla, kun otetaan huomioon ympäristön asettamat rajoitteet. Lisäksi pohditaan, kuinka suuri on varastoinnin tarve sekä, mitkä seikat vaikuttavat varastoinnin tarpeellisuuteen tulevaisuudessa.

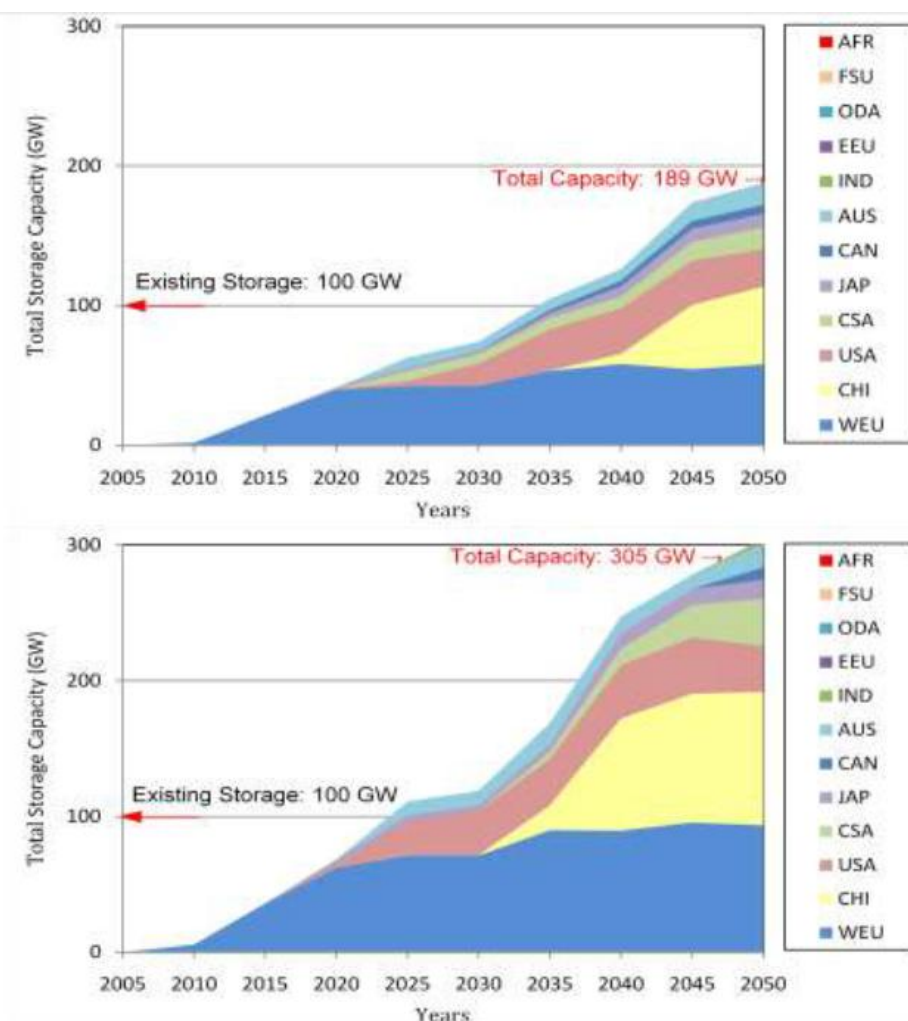
Tässä työssä energian varastoinnin määrää tulevaisuudessa arvioitiin ottamalla huomioon seuraavat asiat:

- arvio uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun energian määrästä
- arvio uusiutuvien energialähteiden vaikutuksesta sähköverkon tasapainoon
- arvio säätötarpeen määrästä
- arvio sähkövarastojen osuudesta säätötarpeeseen.

6.1 Varastoinnin tarve globaalisti ja läntisessä Euroopassa tulevaisuudessa

Älykkäille sähköverkoille ominainen suuri uusiutuvien energianlähteiden käyttö aiheuttaa tulevaisuudessa energiavarastoinnin käytön tarpeen lisääntymistä. Nykyisin maailmanlaajuisesti sähköenergian varastoinnin määrä on noin 100 GW. IEA:n tekemä BLUE Map -skenaarion mukaan tuulivoimalla tuotetaan 11 % ja aurinkovoimalla 12 % maailmanlaajuisesta sähkön tuotannosta vuoteen 2050 mennessä ja hiilidioksidipäästöt puolittuvat vuodesta 2005 vuoteen 2050 mennessä. IEA:n tekemän tutkimuksen mukaan maailmanlaajuisen energian varastoinnin määrää tulee lisätä 89 - 205 GW, jotta saavutetaan BLUE Map -skENARIO. Tämä tarkoittaisi yhteensä 189 - 305 GW. Tässä arviossa oli käytetty uusiutuvien energianlähteiden aiheuttamana lyhytaikaisena sekuntien ja minuuttien mittaisena tehon vaihteluna joko 15 % tai 30 %, mikä selittää poikkeaman. Arvion tarkkuus riippuu erityisesti tuulivoiman tehojen heilahtelujen arvioinnista. Kuva 18 (ks. seur. s.) arvioi energianvarastoinnin määrän

kasvua tulevina vuosikymmeninä. Kuvassa verrataan eri maiden varastointi-
kapasiteetteja vuoteen 2050 asti. [7, s.1 - 2, s. 21, s. 32 - 33.]

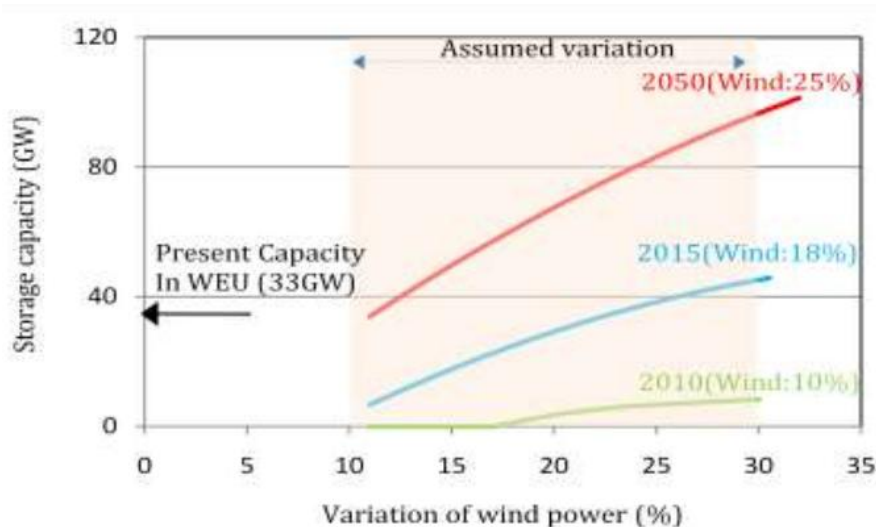


WEU: Western Europe, CHI: China, CSA: Central South America, JAP: Japan, AUS: Australia, IND: India, EEU: Eastern Europe, FSU: Former Soviet Union, AFR: Africa

Kuva 18. Maailmanlaajuisen energianvarastoinnin kasvu tulevina vuosikymmeninä tehon vaihtelun ollessa a) 15 % ja b) 30 %. (7, s.33)

IEA:n tutkimuksen mukaan läntisessä Euroopassa, johon myös Suomi kuuluu, uusiutuvilla tuotetun energian määrä on vuonna 2050 noin 30 %. Varastoinnin tarve riippuu paljolti siitä, kuinka suuri lyhytaikainen tehon vaihtelu on. Mitä suurempi lyhytaikainen vaihtelu on, luonnollisesti silloin myös varastoinnin tarve kasvaa. Lähiaikoina tehdyssä mittauksessa läntisen Euroopan alueella lyhytaikainen tehon vaihtelun arvo oli 6 - 12 %. IEA:n tutkimuksessa todettiin, että lyhytaikaisen vaihtelun

ollessa 5 - 30 %, varastoinnin tarve olisi 0 - 90 GW vuonna 2050. Koska läntisessä Euroopassa on jo 33 GW energiavarastoja, niin tarvittava lisäys olisi 0 - 57 GW. Tutkimuksessa osoitettiin, että jos lyhytaikainen vaihtelu pysyy 5 %:ssa, varastointia ei tarvittaisi, vaikka uusiutuvien määrä olisi suuri. Kuvassa 19 verrataan tuulivoiman tehon vaihtelun vaikutusta varastoinnin tarpeeseen vuosina 2010, 2015 ja 2050 läntisessä Euroopassa. Luvut käyrien päissä tarkoittavat silloista tuulivoiman osuutta sähkön tuotannosta. [7, s. 29 - 31.]



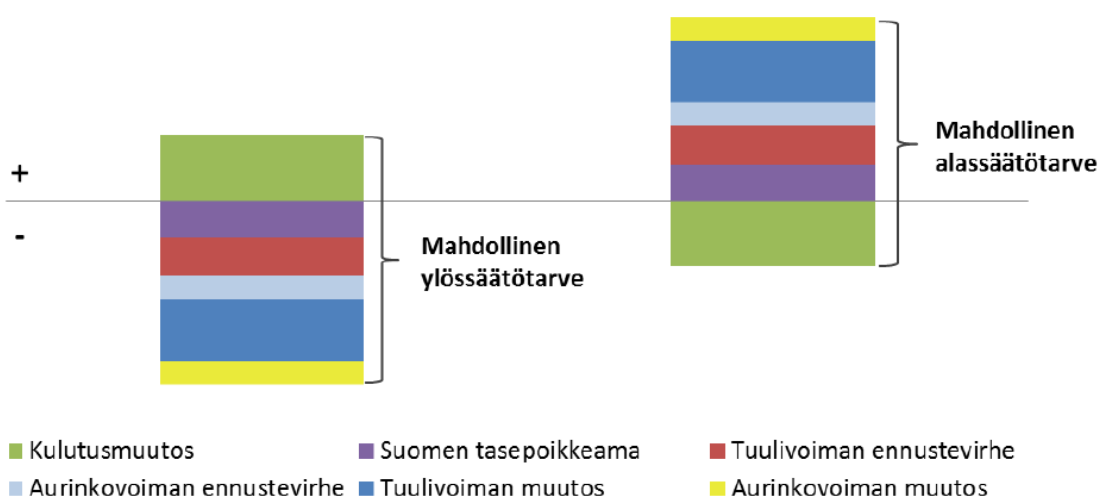
Kuva 19. Tuulivoiman tunninsisäisen tehon vaihtelun vaikutus varastoinnin tarpeeseen vuosina 2010, 2015 ja 2050 läntisessä Euroopassa [7, s.30]

IEA:n mukaan optimaalisimpien energiavarastojen hyödyntäminen eri maissa riippuu täysin maiden yksilöllisistä tarpeista ja olosuhteista. Esimerkiksi CAES voi sopia maihin, joissa esiintyy luonnostaan suolakivi- tai suolavesiesiintymiä. Maissa, joilla on suuri tuulipuistojen määrä, pumppuvoimalaitokset ja CAES ovat käytännöllisiä. Toisaalta erilaiset akut sopivat maihin, joilla ei esiinny sopivia luonnonmuodostelmia näitä teknologioita varten. Kuitenkin akkujen käyttö suurenluokan energiavarastoina vaatii akkuteknologian kustannusten pienentymistä. Esimerkiksi pumppuvoimalaitoksilla tuotettu sähkö on vielä nykyisin huomattavasti edullisempaa kuin natriumakuilla tuotettu. Muun muassa sähköautojen kehitys saattaa alentaa litiumakkujen hintoja, mutta niiden sopivuus sähköverkkoon on vielä epävarmaa. Myös muut teknologiat, jotka varastoivat sähkön muuttamatta sitä toiseen energiamuotoon, saattavat tarjota tulevaisuudessa valtavia mahdollisuuksia. Ne kuitenkin vaativat vielä lisäkehitystä. [7, s.34 - 35.]

IEA:n tutkimuksen mukaan läntisessä Euroopassa teknologiat, jotka pystyvät varaamaan suuren määrän energiaa pitkiksi ajoiksi, ovat käytännöllisimpiä. Suuren tuulivoimakapasiteetin takia erityisen soveltuvia teknologioita ovat pumppuvesivoima, paineilmaenergian varastot ja erilaiset akut. [5, s. 93; 7, s.34 - 35.]

6.2 Varastoinnin tulevaisuuden tarpeet Suomessa

Kun arvioidaan tarvittavan varastoinnin määrää Suomessa, voidaan sitä arvioida tulevaisuudessa esiintyvän säätövajeen avulla. Säätövajeen suuruutta tulevaisuudessa taas voidaan arvioida vaihtelevan uusiutuvan energiantuotannon määrän avulla. Tuotannon ja kulutuksen samanaikaiset vaihtelut aiheuttavat säätötarpeita. Esimerkiksi tuulen hiipussa voi samaan aikaan kulutus kasvaa, jolloin säätötarpeen määrä kasvaa tai toisinpäin, jolloin säädön määrä vähenee. Voimajärjestelmässä täytyy kuitenkin varautua suurimpaan mahdolliseen säädön tarpeeseen. Kuva 20 havainnollistaa tilannetta. [19, s. 40.]

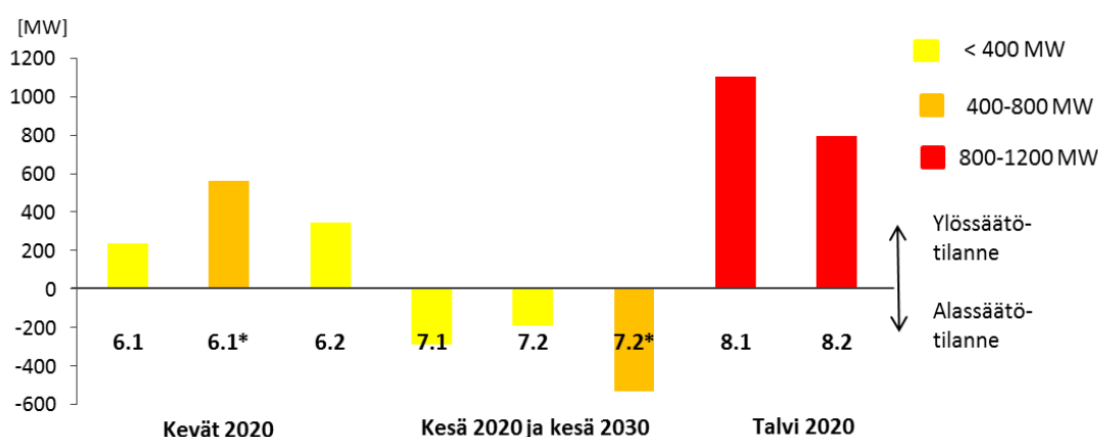


Kuva 20. Ylös- ja allassäätötarve on suurimmillaan, kun eri tekijät aiheuttavat säätötarpeen samaan suuntaan [19, s. 41]

Euroopan komissio on asettanut Suomelle tavoitteeksi tuottaa 38 % (Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY) uusiutuvilla energianlähteillä vuoteen 2020 mennessä ja jopa 55 % vuoteen 2050 mennessä. Fingridin ja VTT:n tutkimuksen mukaan 2000 MW maantieteellisesti hajautettua tuulivoimaa on mahdollista liittää

Suomen voimajärjestelmään vuoteen 2020 mennessä. Tästä tavoitteesta on johdettu tavoite tuulivoiman 2 000 MW:n nimelliskapasiteetille. Joissakin suunnitelmissa on myös kaavailtu 4 000 - 5 000 MW:n tuulivoimakapasiteettia. [20; 21, s.1-3.]

Fingridin arvion mukaan 2000 MW:n tuulivoiman aiheuttama tunnin sisäinen säätötarvearvio olisi 240 - 350 MW. Tämä perustuu tuulivoiman toteutuneisiin tunti- vaihteluihin Suomessa vuosina 2005 - 2008. Jos Suomeen kuitenkin rakennetaan 4 000 MW, kasvaa tunnin sisäinen säätötarpeen määrä VTT:n arvion mukaan vähintään puolella eli 480 - 640 MW:in. VTT:n tekemä arvio 480 - 640 MW:n tuulivoiman säätötarpeesta perustuu tuulivoima- ja kulutusvaihteluiden ja ennustusvirheiden yhteisvaikutukseen. Kuvasta 21 voidaan nähdä arvio tulevaisuudessa tarvittavasta säätötarpeesta. Arviossa on huomioitu tuulivoiman lisäksi myös muiden tuotantomuotojen ja kulutuksen aiheuttamat tunninsisäiset tehon vaihtelut [21, s. 2-3.]



Kuva 21. Suomessa tulevaisuudessa tarvittava säätövoima vuonna 2020 ja 2030 [19, s. 107]

Kuvan 21 mukaan suurimmat säätövajeet olivat jopa 200 - 1 100 MW ja esiintyivät talvella huippukulustilanteissa. Tuulivoimaa ja ydinvoiman määrä on kasvamassa tulevaisuudessa. Koska niitä ei yleensä käsitetä joustavana sähköntuotantona, lisäksi aiheutuu tarve kehittää muun tuotantokapasiteetin joustavuutta, säätökykyä sekä kysyntäjoustoa ja sähkön varastointia. [5. s. 111.]

Edellä esitetystä arviosta saadaan jonkinlainen käsitys, kuinka suuri säätötarve on. Kun säätötarve tiedetään suurin piirtein etukäteen, siihen voidaan reagoida helpommin. Tarvittavien energiavarastojen määrän selvittämiseksi täytyy arvioida, kuinka suuri osuus tästä säätötarpeesta olisi kannattavaa kompensoida energiavarastojen avulla. Tämä on hankalaa, sillä säätöön voidaan vaikuttaa monella eri tavalla. Esimerkiksi säätötarvetta voidaan pienentää lisäämällä siirtokapasiteettia muista maista tai käyttämällä kaasuturbiinivaravoimalaitoksia, käyttösovimuslaitoksia, vesivoimaa sekä käyttämällä irtikytkettäviä kuormia.

Edellä esitetystä säätötarpeen määrästä voitaisiin osa kattaa energiavarastoiden avulla. Edellä mainitut tunninsisäiset säätötarpeet olisi osaksi mahdollista kompensoida esimerkiksi pumppuvoimalaitoksilla tai paineilmalaitoksilla. Hyvin lyhytaikainen sekuntien ja minuuttien mittainen vaihtelu taas voitaisiin kompensoida akkujen, superkondensaattoreiden ja vauhtipyörien avulla. Jos esimerkiksi kaikki tunninsisäinen tuulivoiman aiheuttama säätötarve katettaisiin energiavarastojen avulla, olisi tulevaisuudessa tarvittavan varastoinnin määrä tuulivoiman kapasiteetista riippuen noin 240 - 640 MW. Todellisuudessa tästä määrästä kuitenkin vain osa olisi järkevää kattaa energiavarastojen avulla. Jotta varastoinnin tarpeen määrää Suomessa voitaisiin tarkemmin ennustaa, vaatisi se tarkkojen mittausten ja analyysien tekemistä myös lyhytaikaisesta tehon vaihtelusta.

7 Suomeen soveltuvat varastointiteknologiat

Kuten edellä jo todettiin, riippuu optimaalisimpien energiavarastojen hyödyntäminen täysin maiden yksilöllisistä tarpeista ja olosuhteista. Suomessa suurten korkeuserojen vähyys rajoittaa pumppuvoimalaitosten käyttöä. Paineilma- ja vesivoimavarastojen käyttö Suomessa tulevaisuudessa voisi olla mahdollista, jos sopivia ympäristöjä löytyy ja käyttö on taloudellista. Suomessa todennäköisesti käytetään paljon erityyppisiä akkuja sähkönvarastointiin, jos niiden hinnat tulevaisuudessa laskevat ja ominaisuudet suurenluokan säätövoiman käyttöön kehittyvät. Myös suprajohtavat magneettiset varastot voivat olla potentiaalinen vaihtoehto. Ne kuitenkin vaativat vielä paljon lisätutkimusta. [7, s. 34 - 35; 8, s. 40.]

7.1 Suuren kokoluokan energiavarastot Suomessa

Suurenluokan energiavarastoja kuten pumppuvoimalaitoksia tai paineilmalaitoksia ei vielä Suomessa ole käytössä. Kuitenkin esimerkiksi Pyhäsalmissa sijaitsevasta kaivoksesta ollaan jo tekemässä selvitystä sen mahdollisesta soveltuvuudesta pumppuvoimalaitokseksi. Jos hanke toteutuu, voitaisiin siitä saada noin 200 MW:n energiavarasto. Vaikka Pyhäsalmen kaivoksen vesivarastot eivät olekaan kovin suuret, voitaisiin tätä kompensoida suurella putouskorkeudella, jopa 1 400 metrillä. Pyhäsalmen kaivoksen malmi ehtyy nykyinäymin vuonna 2019, minkä jälkeen voitaisiin aloittaa rakennustyöt.

Tätä pumppuvoimalaitosta voitaisiin käyttää esimerkiksi useiden eri tuulivoimaloiden tuotannon tasaukseen tai nopeaksi varavoimaksi tilanteissa, joissa sähköverkossa on tehopula. Toinen vaihtoehto pumppuvoimalaitoksille on niiden rakentaminen jo olemassa olevien vesivoimalaitosten yhteyteen. Paineilma-energiavaraston käytöstä Suomessa ei ole ainakaan vielä mitään suunnitelmia. Jos kuitenkin paineilma-energiavarastoille tarvittavia ympäristöjä löytyy, niitä todennäköisesti otetaan käyttöön, koska niillä voitaisiin varastoida suuria määriä energiaa ja reagointiajat ovat lyhyitä.

Suurimmat energiayhtiöt Suomessa ovat kaavailleet rannikolle suuria merituulivoimaloita, koska tuulivoimasta tulee todennäköisesti tärkeä osa sähköntuotantoa. Yksi mahdollisuus paineilma-energiavarastojen hyödyntämiselle voisi olla vedenalaisten joustavien varastojen käyttö merellä sijaitsevien tuulivoimaloiden yhteydessä. Tällöin voitaisiin tehostaa merellä sijaitsevien tuulivoimaloiden toimintaa ja korvata vähätuulisten jaksojen aiheuttamaa tuotannon vajetta. Tämä olisi kuitenkin kaukana tulevaisuudessa, sillä vedenalaisten varastojen kehitystyö on vasta alussa. [5, s. 115; 8; s. 4; 20; 22.]

7.2 Akkuteknologioiden käyttö Suomessa tulevaisuudessa

Pienempien, akkuihin perustuvien hajautettujen sähkövarastojen käyttö Suomessa todennäköisesti yleistyy ennen suurenluokan sähkövarastoja. Tämä johtuu siitä, että pienemmät sähkövarastot ovat edullisempia ja niistä saataisiin teknisiä ja taloudellisia tuloksia, joita voitaisiin hyödyntää suurenluokan sähkövarastojen kannattavuuden

arvioinnissa. Lähitulevaisuudessa akkuja käytetään sovelluksiin, joissa ei tarvita suurta kapasiteettia kuten taajuuden säätöön, sähkön laadun parantamiseen, lyhytaikaiseksi varavoimaksi sekä huipputehon välttämiseen.

Huomioiden akkujen iän, hyötysuhteen, latauskerrat ja ympäristön lämpötilan on akkuvarastojen käyttö taloudellista ainoastaan lyhytaikaiseen huippujen leikkaamiseen. Nykyisin akkujen hinta on 500 - 1 000 euroa/kWh ja niissä varastoidun energiayksikön hinta 10 - 12 snt/kWh. Kuitenkin akkujen hinnat ovat laskeneet koko ajan ja, jos tulevaisuudessa energiayksikön varastointikustannukset alenevat 1 - 2 snt/kWh:n tasolle, tulee akkujen käyttö myös pidempiaikaiseen varastointiin mahdolliseksi. Tällöin niitä voitaisiin käyttää useisiin eri sovelluksiin ja myös pidempiaikaisena ja korkea-tehoisena säätövoimana.

Ensimmäinen Suomeen rakennettava älykäs sähköverkkokokeilu rakennetaan Kalasatamaan, jossa käytetään energian varastointiin litiumioniakkuja. Varasto muodostuu 10 000 akusta, joiden kapasiteetti on 0,5 MWh. Suomessa vähäisten korkeuserojen takia esimerkiksi pumppuvoimalaitosten rakentaminen on ongelmallista. Tämän takia akkupohjaisten energiavarastojen osuus tulee todennäköisesti olemaan merkittävä myös Suomessa. Myös akkukäyttöisten sähkövarastojen modulaarinen rakenne mahdollistaa niiden käytön sähköverkon eri jännitetasoissa. [8, s. 40, 33; 5, s. 93; 23.]

7.3 Sähköautojen käyttö Suomessa tulevaisuudessa

Työ- ja elinkeinoministeriön asettamien tavoitteiden mukaan 25 % vuonna 2020 myytävistä uusista henkilöautoista olisi sähköverkossa ladattavia. Tällöin sähköautojen käyttö olisi 0.5 TWh. Vuonna 2030 sähköautojen käyttö olisi jo 3 TWh. Tämä tarkoittaisi 20 GWh:n sähkövarastoa. Tällöin sähköautojen määrä olisi 1 000 000 autoa. Sähköautoja voitaisiin käyttää huippuajan kysynnän tarpeeseen syöttämällä sähköautojen akuista sähköä verkkoon tai tasoittamaan kulutusvaihteluita älykkäällä lataamisella. Taulukosta 4 (ks. seur. s.) voidaan nähdä sähköautojen määrien kehitysskenaariot Suomessa. Taulukossa 4 EV tarkoittaa sähköautoa (electric vehicle) ja PHEV tarkoittaa ladattavaa hybridisähköautoa (Plug-in Hybrid Electric Vehicle). [5, s. 95; 24, s.13 - 14.]

Taulukko 4. Sähköajoneuvojen määrien kehitysskenaariot Suomessa [24, s.14].

	Osuus uusista autoista, %				Kumulatiivinen myyntimäärä, kpl			
	2020		2030		2020		2030	
	EV	PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV	EV	PHEV
Perusskenaario	3	10	20	50	13 000	66 000	160 000	480 000
Nopea skenaario	6	40	40	60	26 000	190 000	450 000	960 000
Hidas skenaario	2	5	10	20	12 000	38 000	92 000	207 000

7.4 Vesivoiman varastointi

Suomessa vesivoimaa on noin 3 100 MW ja vesivoiman osuus sähköntuotannosta vaihtelee vuosittain 10 - 20 % riippuen vesitilanteesta. Vesivoimaloiden ohjauksissa kuitenkin tuhlautuu paljon energiaa. Tämä voitaisiin estää varastoimalla tämä energia. Esimerkiksi liittämällä akkuja vesivoimaloihin voitaisiin ylimääräinen energia varastoida. Vuonna 2012 Kemijoen voimalan juoksutuksissa koneistojen ohi meni 500 GWh, joka vastaa 115 000 kotitalouden sähkönkulutusta vuodessa. Vesivoimaa ei siis tulisi käyttää säätöön ohjauksuttamalla, koska silloin menetetään ilmaista energiaa. Energiavarastoille nähdäänkin nyt olevan selkeä markkinarako. Niiden tulisi kuitenkin olla teknologisesti toimivia, taloudellisesti kannattavia ja yhteiskunnallisesti hyväksyttäviä. Energiavarastojen käytöstä sähkön säätövoiman turvaamiseksi onkin tullut keskeinen osa energiapoliittista keskustelua. [23; 25.]

8 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä selvitettiin eri energiavarastojen tehtäviä tulevaisuuden älykkäissä sähköverkoissa sekä ennustettiin tarvittavan varastoinnin määrää maailmalla ja Suomessa. Tämän lisäksi vertailtiin erilaisten varastointitekniikoiden taloudellisia ja teknisiä ominaisuuksia keskenään sekä selvitettiin, mitkä energiavarastot olisivat sopivimpia Suomeen tulevaisuudessa.

Älykkäissä sähköverkoissa energian varastoinnilla on tärkeä tehtävä. Se mahdollistaa suuren uusiutuvien energianlähteiden määrän tasaamalla tuotannon vaihtelua. Energiavarastoilla voidaan taata katkoton sähkön jakelu ja sähkön laadun pysyminen

hyvänä. Näiden lisäksi varastointi mahdollistaa kuluttajien oman hajautetun pientuotannon varastoinnin, jolloin varastoitu energia voidaan käyttää itse tai myydä sähköverkkoon.

Suuren kokoluokan energiavarastoja voidaan käyttää pitkäaikaisena varavoimana ja uusiutuvien energianlähteiden tuotannon tasauksessa säätövoimana esimerkiksi useiden eri tuulivoimaloiden yhteydessä. Erityyppisiä akkuja voidaan käyttää monissa eri sovelluksissa. Pienemmän kokoluokan akut sopivat hyvin sovelluksiin, joissa ei tarvita suurta kapasiteettia. Esimerkiksi lyhytaikainen varavoima, taajuuden säätö ja sähkön laadun parantaminen ovat tällaisia sovelluksia. Myös akut sähköautoissa ovat oleellinen osa älykästä sähköverkkoa. Toisaalta suurenluokan akustoja voidaan käyttää pidempiaikaisena säätövoimana ja varavoimana, kun akkujen hinnat laskevat.

Sopivimman energiavaraston löytäminen ei ole aivan yksinkertaista, sillä se riippuu paljon käyttökohteesta. Nykyään suurenluokan energiavarastot kuten pumppuvoimalaitokset ja CAES ovat taloudellisimpia. Toisaalta ne vaativat tietyn tyyppisen ympäristön, mikä varsinkin Suomessa aiheuttaa ongelmia. Akut puolestaan ovat rakenteeltaan sopivampia, mutta niiden hinnat ja tekniset ominaisuudet eivät välttämättä sovellu kaikkiin sovelluksiin. Toisaalta akkujen hintakehitys on ollut koko ajan alenevaa ja ne saattavat tulevaisuudessa olla huomattavassa tehtävässä sähköverkossa. Muista energiavarastoista SMES saattaa tulevaisuudessa olla hyvinkin potentiaalinen vaihtoehto. Nykyisin se kuitenkin on vielä todella kallis tapa varastoida sähköä.

Työssä tutkittiin myös energian varastoinnin määrän tarvetta tulevaisuudessa. IEA:n tekemän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että varastoinnin määrä riippuu paljon uusiutuvien aiheuttamasta nopeasta tehon vaihtelusta. Varastoinnin määräksi arvioitiin koko maailman osalta vuonna 2050 noin 189 - 305 GW ja läntisen Euroopan osalta 0 - 90 GW. Suomesta todettiin, että vuonna 2020 tunninsisäinen säätövaje voisi suurimmillaan olla 200 - 1100 MW riippuen ajankohdasta ja tuulivoiman aiheuttama tunninsisäinen säätötarve olisi 4000 MW:n kapasiteetilla 640 MW. Tarkan energian varastoinnin määrän ennustamiseen vaadittaisiin kuitenkin tarkkojen mittausten tekemistä ja varastoinnin tarpeellisuuden arvioimista. Myös käytännön kokemusta tarvittaisiin lisää, jotta voitaisiin paremmin arvioida energiavarastojen tarpeellisuutta sekä niiden toimivuutta edellä mainituissa lukuisissa eri sovelluksissa.

Lähteet

- 1 Sarvaranta, Anni. 2010. Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroopan unionissa ja Suomessa. Harjoitustyö. Verkkodokumentti.
http://energia.fi/sites/default/files/alykkaat_sahkoverkot_2010_diplomityo_anni_sarvaranta.pdf. Luettu 15.3.2013.
- 2 Älykäs sähköverkko. 2013. Verkkodokumentti.
http://fi.wikipedia.org/wiki/%C3%84lyk%C3%A4s_s%C3%A4hk%C3%B6verkko. Luettu 20.3.2014.
- 3 Älykäs verkko eli Smart Grid. 2014. Verkkodokumentti.
<http://energia.fi/sahkomarkkinat/sahkoverkko/alykas-verkko>. Luettu 24.3.2014.
- 4 Älykäs sähköverkko. 2014. Verkkodokumentti. <http://www.lut.fi/green-campus/alykas-sahkoverkko-smart-grid>. Luettu 27.3.2014.
- 5 Energiategollisuus ry ja Fingrid Oyj. Mistä lisäjousto sähköjärjestelmään? Loppuraportti. 2012.
http://energia.fi/sites/default/files/mista_lisajousto_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf. Luettu 8.3.2014.
- 6 Grid Energy Storage U.S. Department of Energy. December 2013. Verkkodokumentti.
<http://energy.gov/sites/prod/files/2013/12/f5/Grid%20Energy%20Storage%20December%202013.pdf>. Luettu 20.3.2014.
- 7 IEA. Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids. 2009. Verkkodokumentti.
http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_storage.pdf. Luettu 10.3.2014.
- 8 Nokelainen, Tomi. 2013. Akkupohjaisten energiavarastojen käyttösovellukset tulevaisuuden sähköverkoissa. Insinööritö. Metropolia AMK.
http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58260/Nokelainen_Tomi.pdf?sequence=1. Luettu 18.3.2014.
- 9 Energian varastointi. 2014. Verkkodokumentti.
http://fi.wikipedia.org/wiki/Energian_varastointi. Luettu 20.4.2014
- 10 List of pumped-storage hydroelectric power. 2014. Verkkodokumentti.
http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pumped-storage_hydroelectric_power_stations. Luettu. 21.4.2014

- 11 A five minute guide to electricity storage.2014. Verkkodokumentti.
http://www.arup.com/Publications/5_minute_guide_to_electricity_storage.aspx.
Luettu 18.3.2014.
- 12 Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S., Saari, P. 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT tiedote. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>. Luettu 11.3.2014.
- 13 The future role and challenges of Energy Storage.2012.Verkkodokumentti. European commission.Nhttp://ec.europa.eu/energy/infrastructure/doc/energy-storage/2013/energy_storage.pdf. Luettu 5.3.2013.
- 14 Virtanen, Ville.Energian varastointimuodot.2010. LuK-tutkielma.Turun yliopisto.
http://www2.physics.utu.fi/projects/kurssit/UFYS2100/muuta/Luk_Virtanen.pdf.
Luettu 5.4.2014.
- 15 Chen, H., Zhang, X., Liu, J., Tan, C. 2013. Verkkodokumentti. Compressed Air Energy Storage. <http://www.intechopen.com/books/energy-storage-technologies-and-applications/compressed-air-energy-storage>. Luettu 20.4.2014.
- 16 Kylkisalo, T., Alanaen, R. 2007. Verkkodokumentti. Tasajännite taajaman sähköjakelussa ja mikroverkoissa. VTT Working Papers.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2007/W78.pdf>. Luettu 7.3.2013.
- 17 Piirto, Tuukka. 2011. Hajautetun tuotannon ja saarekeverkon tehotasapainon ylläpitäminen akustoilla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
<http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/20878/piirto.pdf?sequence=3>. Luettu 17.3.2014.
- 18 Verkkovisio 2030 Jakelu- ja alueverkkojen teknologiavisio. 2006. Verkkodokumentti. VTT .
http://www.merinoa.fi/tiedostopankki/Verkkovisio_2030_loppuraportti_86.pdf.
Luettu 1.5.2014.
- 19 Laitinen, Laura. 2013. Tunninsisäinen tehotasapaino Suomessa 2020 ja 2030. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/90596/Tunninsis%C3%A4inen%20tehotasapaino%20Suomessa%202020%20ja%202030.pdf?sequence=2>. Luettu 5.3.2014.
- 20 Tuulivoima Suomessa. 2014. Verkkodokumentti.
http://fi.wikipedia.org/wiki/Tuulivoima_Suomessa. Luettu 20.3.2014
- 21 2000 ja 4000 MW tuulivoiman liittäminen Suomen sähköjärjestelmään. 2008. Verkkodokumentti.
https://www.tem.fi/files/20191/2000_ja_4000_MW_tuulivoiman_liittaminen_Suomen_sahkojarjestelmaan_Fingrid_ja_VTT_syyskuu_2008.pdf. Luettu 2.3.2014

- 22 Pyhäsalmen kaivoksesta halutaan jättimäinen sähkövarasto. 2013. Verkkodokumentti. Tekniikka & Talous. <http://www.tekniikkatalous.fi/energia/pyhasalmen+kaivoksesta+halutaan+jattimainen+sahkovarasto/a918663>. Luettu. 5.4.2014.
- 23 Sähkön varastoinnin tarve kasvussa - uudet teknologiat vastaavat tarpeeseen hitaasti. 2014. Verkkodokumentti. http://www.kemijoki.fi/kejo-fi/sp_Content87101. Luettu 10.4 2014.
- 24 Ruska, M., Kiviluoma, J., Koreneff, G. 2010. Sähköautojen laajan käyttöönoton skenaarioita ja vaikutuksia sähköjärjestelmään. Verkkodokumentti. VTT. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2010/W155.pdf>. Luettu 1.4.2014.
- 25 Vesivoima. 2014. Verkkodokumentti. <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/energialahteet/vesivoima>. Luettu 5.4.2014

. Tyypillisten sähkövarastojen ominaisuuksien vertailu

Storage technology	PHS	CAES	Hydrogen	Flywheel	SMES	Supercap	Conventional Batteries		Advanced Batteries			Flow batteries	
							Pb-acid	NiCd	Li-ion	NaS	Na/NiCl ₂ ZEBRA	VRB	ZnBr
Power rating, MW	100-5000	100-300	0.001-50	0.002-20	0.01-10	0.01-1	0.001-50	0.001-40	0.0010-1	0.5-50	0.001-1	0.03-7	0.05-2
Energy rating	1-24h+	1-24h+	s-24h+	15s-15min	ms-5min	ms-1h	s-3h	s-h	min-h	s-hours	Min-h	s-10h	s-10h
Response time	s-min	5-15 min	min	s	Ms	ms						ms	ms
Energy density, Wh/kg	0.5-1.5	30-60	800-104	5-130	0.5-5	0.1-15	30-50	40-80	75-250	150-240	125	75	60-80
Power density, W/kg			500+	400-1600	500-2000	0.1-10	75-300	150-300	150-315	90-230	130-160		50-150
Operating temp (°C)				-20-+40		-40-+85				300-350	300	0-40	
Self-discharge (%/day)	-0	-0	0.5-2	20-100	10-15	2-40	0.1-0.3	0.2-0.6	0.1-0.3	20	15	0-10	1
Round-trip efficiency	75-85	42-54	20-50	85-95	95	85-98	60-95	60-91	85-100	85-90	90	85	70-75
Lifetime (years)	50-100	25-40	5-15	20+	20	20+	3-15	15-20	5-15	10-15	10-14	5-20	5-10
Cycles	2x10 ⁴ - 5x10 ⁴	5x10 ³ - 2x10 ⁴	10 ³ +	10 ⁵ -10 ⁷	10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁸	100-1000	1000-3000	10 ³ -10 ⁴	2000-4500	2500+	10 ⁴	2000+
Power cost €/kW	500-3600	400-1150	550-1600	100-300	100-400	100-400	200-650	350-1000	700-9000	700-2000	100-200	2500	500-1800
Energy cost €/kWh	60-150	10-120	1-15	1000-3500	700-7000	300-4000	50-300	200-1000	200-1800	200-900	70-150	100-1000	100-700

Note. The power price reported for hydrogen relates to gas turbine based generator. The power price for fuel cells is in range of 2 000-6 600 €/kW. Sources: Schoenung and Hassenzahl, 2003; Chen et al., 2009; Beaudin et al., 2010; EERA, 2011; BNEF, 2011b; Nakhamkin, 2008.