



LUT
Lappeenranta
University of Technology

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0201 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

SÄHKÖN VARASTOINTI

Electrical Energy Storage

Työn tarkastaja: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Työn ohjaaja: Professori, TkT Esa Vakkilainen

Lappeenranta 27.5.2015

Anu-Maria Olli

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Energiatekniikan koulutusohjelma

Anu-Maria Olli

Sähkön varastointi

Electrical Energy Storage

Kandidaatintyö

2015

27 sivua, 11 kuvaa, 3 taulukkoa ja 1 liite

Hakusanat: sähkön varastointi, uusiutuva energia, sähkövoimajärjestelmä

Kiinnostus sähkön varastointia kohtaan on kasvussa. Nykypäivänä ja etenkin tulevaisuudessa sähkövarastoilla voidaan parantaa energiantuotannon resurssitehokkuutta ja tukea aurinko- ja tuulisähkön käytön lisäämistä.

Sähkövarastoja on pieniä ja suuria. On olemassa mekaanisia, sähkökemiallisia, kemiallisia ja sähköisiä varastoteknologioita. Varastoitua energiaa voidaan käyttää eri tehtävissä. Tehtävät vaihtelevat varastoidun energian määrässä ja siinä, millä teholla energia voidaan purkaa varastosta. Suurilla sähkövarastoilla taataan sähköntoimitus ja pienillä parannetaan sähkön laatua jakeluverkossa.

Sähkövarastoja ei ole vielä laajasti otettu käyttöön, koska ne ovat kalliita. Sähkövaraston investointikustannukset ovat tällä hetkellä vähintään yhtä suuret kuin samankokoisen perinteisen voimalaitoksen. Sähkövarastojen tutkimus ja kehitys pienentää investointikustannuksia ja nopeuttaa varastojen laajempaa käyttöönottoa.

SISÄLLYSLUETTELO

Lyhenneluettelo

1 Johdanto	5
2 Sähkövoimajärjestelmä ja sen hallinta	6
3 Sähkön varastointi	8
3.1 Sähkövaraston rooli sähköverkossa	9
3.2 Sähkövaraston rooli uusiutuvan energian tuotannossa	11
4 Sähkön varastoinnin teknologiat	13
4.1 Pumppuvoimalaitos (PSH)	15
4.2 Paineilmavarasto (CAES)	16
4.3 Vauhtipyörät	17
4.4 Akut	18
4.5 Vetyvarasto	20
4.6 Suprajohtava magneettisen energian varasto (SMES)	21
4.7 Superkondensaattorit	23
5 Sähkövaraston investointikustannukset	24
6 Yhteenveto	27
Lähdeluettelo	28

Liite 1. Sähkön varastointisovellusten ominaisuuksia ja soveltuvia teknologioita

LYHENNELUETTELO

CAES	Paineilmavarasto, <i>Compressed Air Energy Storage</i>
PSH	Pumppuvoimalaitos, <i>Pumped Storage Hydropower</i>
SMES	Suprajohtava magneettisen energian varasto, <i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i>
VRE	Satunnaisesti vaihteleva uusiutuva energia, <i>Variable Renewable Energy</i>

1 JOHDANTO

1970-luvun öljykriisin ja sitä seuranneen öljyn ja kaasun hintojen rajun nousun seurauksena kiinnostus sähkön varastointiin kohtaan kasvoi. Kiinnostus johti investointeihin. Pumppuvoimalaitoksia rakennettiin ja muiden varastoteknologioiden kehitykseen panostettiin. 1980-luvulla sähkövarastojen kehitys kuitenkin hidastui, kun öljyn ja kaasun hinnat laskivat. Pumppuvoimalaitosten sijaan oli kannattavampaa rakentaa kaasuvoimaloita. (Denholm et al. 2011, 7–10.)

2000-luvulla kiinnostus sähkövarastoja kohtaan on jälleen kasvanut. Aiemmin sähkövarastojen päätehtävä on ollut tuottaa rahallista hyötyä kysynnän vaihtelusta johtuen. Nykypäivänä ja etenkin tulevaisuudessa sähkön varastoinnilla voidaan parantaa energiantuotannon resurssitehokkuutta ja tukea erilaisten uusiutuvien energiantuotantomuotojen käytön lisäämistä. (IEA 2014a, 6.)

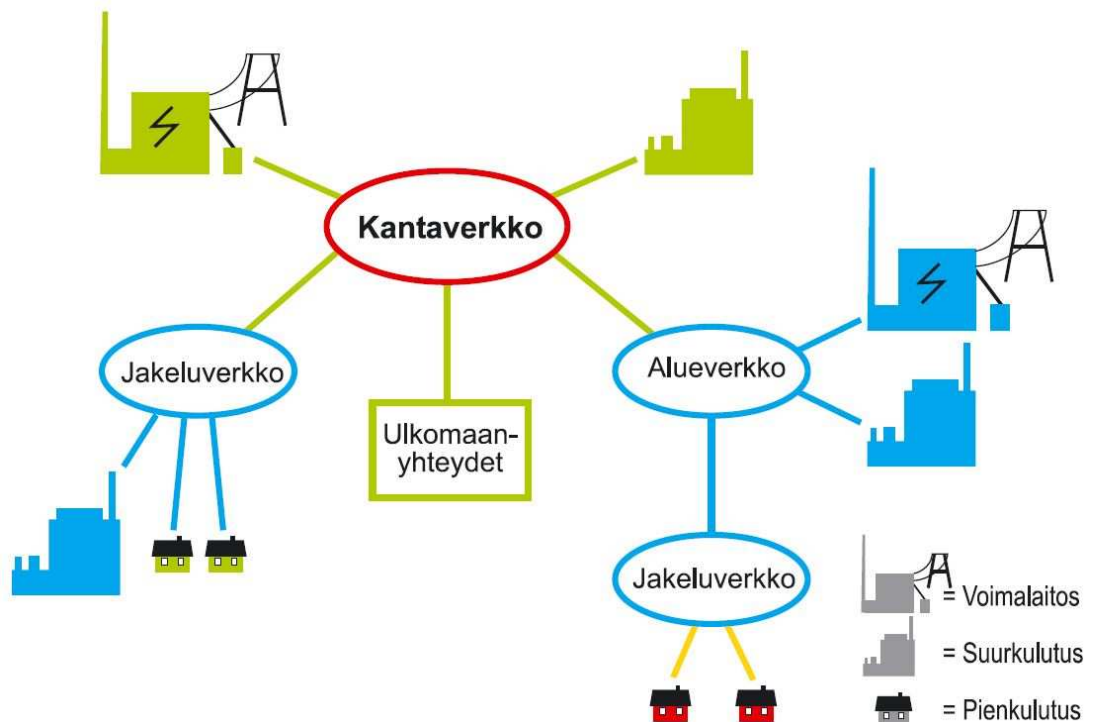
Sähköntuotantoon on aina liittynyt ongelma kysynnänennustamisesta. Vaikka kysyntää voidaan ennustaa ajankohtaan ja sääennusteisiin perustuvilla malleilla, odottamattomat heilahtelut kysynnässä ja myös tuotannossa ovat yleisiä. (ESA, Energy Storage.) Sähkövarastojen avulla sähköjärjestelmät voivat toimia entistä luotettavammin, pienemmällä hinnalla ja vähemmällä päästöillä (ESA, Technology Applications).

Tämä kandidaatin tutkinnon lopputyö on kirjallisuusselvitys sähkön varastoinnista. Työn tavoitteena on selvittää, miksi ja missä tilanteissa sähköä kannattaa varastoida ja miten se käytännössä toteutetaan. Sähkövarastoja tarkastellaan erityisesti sähkövoimajärjestelmän hallinnan ja uusiutuvan energian käytön näkökulmista. Tässä työssä ei käsitellä lämpö- tai kylmävarastoja eikä sähköajoneuvojen energiavarastosovelluksia.

Työ koostuu kuudesta luvusta. Johdannon jälkeen kerrotaan sähkövoimajärjestelmästä ja sen hallinnan periaatteista. Kolmannessa luvussa esitellään sähkövarastojen käyttömahdollisuuksia ja neljännessä luvussa sähkön varastoinnin teknologioita. Ennen yhteenvetoa tarkastellaan vielä sähkön varastoinnin kannattavuutta.

2 SÄHKÖVOIMAJÄRJESTELMÄ JA SEN HALLINTA

Sähkövoimajärjestelmällä tarkoitetaan yhteiskunnan infrastruktuurin osaa, joka koostuu sähkön tuotannosta voimalaitoksissa, siirrosta ja jakelusta sähköverkoissa sekä kulutuksesta (Kuva 1). Sähköntuotanto, -siirto ja -kulutus vaihtelevat jatkuvasti – tunneittain, vuorokausittain ja vuodenajoittain. (Fingrid Oyj.)

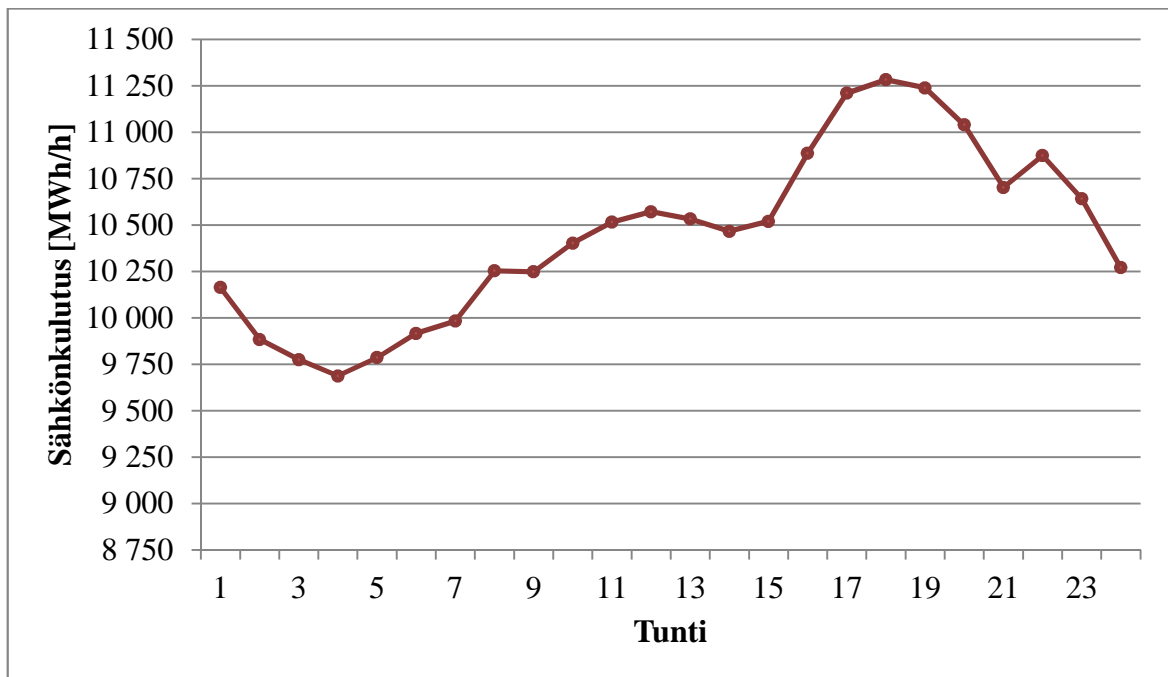


Kuva 1. Suomen sähkövoimajärjestelmä koostuu sähköntuotannosta voimalaitoksilla, sähkönsiirrosta kanta-, jakelu- ja alueverkoissa sekä sähkönkulutuksesta. (Lähde: Hoffman et al. 2004.)

Sähköntuotannon ja -kulutuksen on oltava tehotasapainossa, jotta sähkövoimajärjestelmän taajuus säilyy tasaisena. Suomen sähköverkko on osa yhteispohjoismaista järjestelmää, jonka taajuus on kaikkialla sama. Jos kulutus on tuotantoa suurempaa, taajuus pienenee. Jos kulutus on tuotantoa pienempää, taajuus kasvaa. Pohjoismaissa sähköverkon perustaajuus on 50 hertsiä. Taajuuden sallittu vaihteluväli on 49,9–50,1 hertsiä normaaleissa olosuhteissa. Jos verkon taajuus muuttuu liikaa, eivät siihen liitetyt sähkölaitteet toimi suunnitellulla teholla. (Hoffman et al. 2004, 78–82.)

Sähköntuotanto Suomessa vuonna 2014 oli 65,4 terawattituntia. Sähköntuotannon energianlähteistä 39 prosenttia oli uusiutuvia ja 74 prosenttia hiilidioksidivapaita. Tärkeimmät energianlähteet olivat ydinvoima, vesivoima, kivihiihi, puupolttoaineet ja turve. Tuulivoiman osuus sähköntuotannosta oli 1,7 prosenttia ja se on kasvussa. (Energiateollisuus 2015.)

Kuvassa 2 on esitetty esimerkkinä sähkönkulutus Suomessa keskiviikkona 25.1.2015 tunneittain. Kuvasta nähdään, kuinka voimakkaasti kulutus vaihtelee vuorokauden eri tunteina. Kulutus on pienimmillään aamuyöllä ja suurinta illan alussa. Sähkönkulutus vaihtelee vuorokaudenajan lisäksi viikonpäivän ja vuodenajan mukaan. Sähkön varastointi mahdollistaa sen, ettei hetkellisen sähköntuotannon tarvitse aina vastata kysyntää ja tehotasapaino säilyy (IEA 2014a, 6).



Kuva 2. Sähkönkulutus Suomessa 25.1.2015 oli suurimmillaan 11,28 GWh/h ja pienimmillään 9,69 GWh/h. (Lähde: Nord Pool Spot 2015.)

3 SÄHKÖN VARASTOINTI

Energiavarasto on systeemi, johon voidaan siirtää tietty määrä energiaa, josta suurin osa voidaan myös palauttaa. Energiaa voidaan varastoida eri muodoissa. Palautetun energian laatu on yleensä sama kuin varastoidun. Varastoon säilötty sähköenergia vapautetaan varastosta tavallisesti sähköenergiana. Varastoidun ja vapautetun energian laatu voi olla myös eri. Silloin ei ole kyse todellisesta varastosta, mutta samankaltaisen mekanismin vuoksi myös tällaisia sovelluksia kutsutaan varastoiksi. (Da Rosa 2013, 821.)

Varastoitua energiaa voidaan käyttää eri tarpeisiin riippuen varastoidun energian määrästä ja siitä, millä teholla energia voidaan purkaa varastosta. Suurilla varastoilla taataan sähköntoimitus ja pienillä parannetaan sähkön laatua jakeluverkossa. Varastoja on pieniä ja suuria, paikallaan olevia ja siirrettäviä. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 307–308.)

Taulukossa 1 on esitetty sähkövarastojen jako sovellusluokkiin. Yhdysvaltojen energiaministeriön alainen SANDIA-laboratorio (2007, 12) jakaa sähkövarastot kolmeen sovellusluokkaan. Niitä ovat suuret varastot, hajautettu sähkön jakelu ja sähkön laadunhallinta. Sovelluksilla on käyttötarkoitukseensa soveltuva purkausteho ja -aika sekä varastoidun energian määrä. Sähkövarastoja voi sijoittaa sähkövoimajärjestelmän eri tasoille. Sähkövarastoista on hyötyä niin tuotannossa, siirrossa, jakelussa kuin kulutuksessakin. (IEA 2014b, 140.)

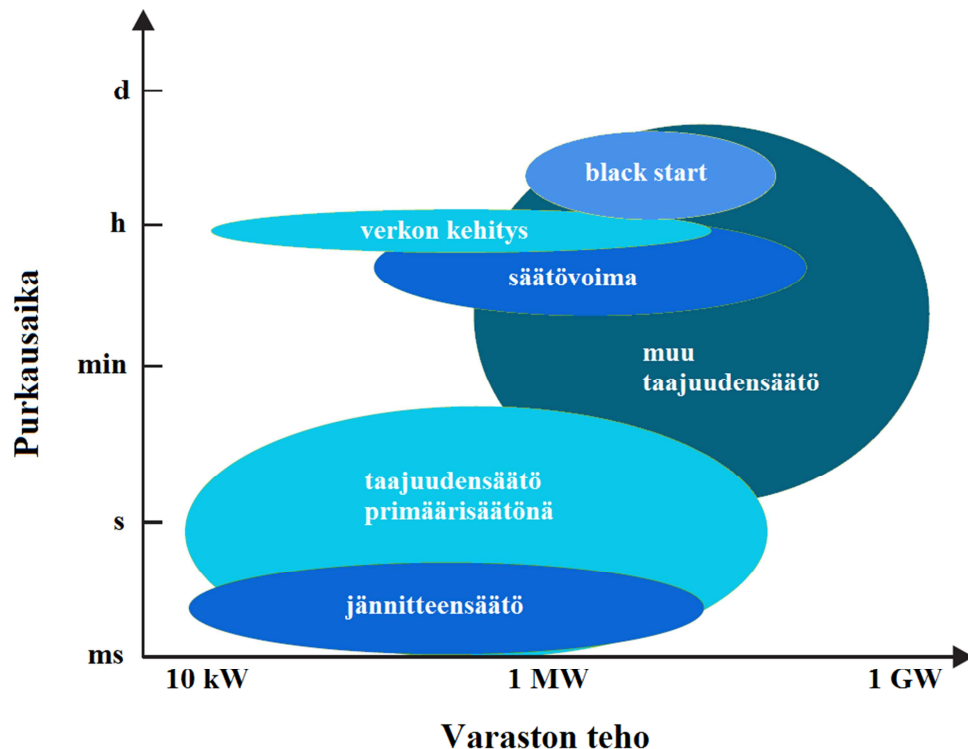
Taulukko 1. Sähkövarastojen sovellusluokat sähkövoimajärjestelmässä. (Lähde: SANDIA 2007, 12.)

Sovellusluokka	Purkausteho	Purkausaika	Varastoitu energia	Tyypilliset toiminnot
Suuret varastot	10–1000 MW	1–8 h	10–8000 MWh	kuormituksen tasaus
Hajautettu jakelu	100–2000 MW	0,5–4 h	0,05–8 MWh	huipun tasaus
Sähkön laadunhallinta	0,1–2 MW	1–30 s	0,1–60 MJ (0,028–16,67 kWh)	sähkön laatu ja luotettavuus

3.1 Sähkövaraston rooli sähköverkossa

Sujuva sähköverkon käyttö edellyttää sähkön kysynnänennustamista ja tuotannon aikataulutusta, mikä on monimutkaista ja vaikeaa. Hetkellisen tuotannon on aina vastattava vaihtelevaa kysyntää. Osa kysynnästä, pohjakuorma, katetaan tuotannon perusvoimalla eli voimalaitoksilla, joita ajetaan jatkuvasti täydellä teholla. Säättövoimaa käytetään vastaamaan kuorman tai kysynnän päivittäisiin muutoksiin. Ennalta arvaamaton, yhtäkkiäinen kysynnän kasvu tai lasku katetaan varavoimalla. (Denholm et al. 2011, 3–7.)

Eri varastoteknologiat soveltuvat erilaisiin tehtäviin sähkövoimajärjestelmässä. Tällaisia tehtäviä ovat esimerkiksi sähkön jännitteen ja taajuuden säätö sekä pimeäkäynnistys. Kuvassa 3 on esitetty tavallisimpia sähkövarastojen sovelluksia. Kuvasta huomataan, miten sovellukset eroavat toisistaan purkaustehon ja -ajan perusteella. (IEA 2014b, 141–142.)



Kuva 3. Sähkövoimajärjestelmän hallinnan sovelluksissa vaadittava purkausaika voi olla millisekunneista päiviin ja -teho kilowateista gigawatteihin. (Lähde: IEA 2014b, 142.)

Sähköverkon jännitteen säätöön voidaan käyttää nopeasti käynnistyvää energialähdettä, jolta vaadittava purkausaika on vain muutamia sekunteja. Taajuuden ylläpidossa

purkausajan tulisi olla vähän pidempi, muutamia minuutteja. Tuntien ja päivien purkausajat sekä isommat tehot sopivat tuotannon ja kysynnän tasapainon pidempikestoiseen hallintaan. (IEA 2014b, 141–142.)

Sähköenergiavarastoilla voidaan tasoittaa kysynnän ja tarjonnan eroja. Kun varastoja ei ole, on tuotettu sähkö käytettävä välittömästi. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 307.) Sähköä kannattaa varastoida silloin, kun sen hinta on matala, ja purkaa varastosta, kun hinta on korkea. Tätä kutsutaan arbitraasiksi. Arbitraasilla tarkoitetaan tilannetta, jossa saavutetaan voittoa ilman riskiä. (Denholm et al. 2011, 10–16.)

Black start -termillä eli pimeäkäynnistyksellä tarkoitetaan voimalaitoksen käynnistystä ja sähkön syöttöä kaatuneeseen, jännitteettömään verkkoon. Tällaisia voimalaitoksia tarvitaan, jotta verkkoon saadaan palautettua jännite. Myös sähkövarastolla voi olla *black start* -ominaisuus. Tällaisen varaston purkausajan on oltava useita tunteja ja sen vuoksi varastoteknologioista pumppuvoimalaitosta on käytetty pimeäkäynnistyksessä. (Denholm et al. 2011, 10–16.)

Sähköverkot mitoitetaan suurimman kuormitushuippunsa mukaan. Sähkönsiirto- ja jakeluverkkoa on uusittava esimerkiksi silloin, kun verkon kuormitus kasvaa eikä vanha mitoitus ole enää riittävä. Sähkövarastoilla voidaan lykätä tai jopa välttää kalliit verkkoinvestoinnit, jotka on tehtävä kattamaan kasvanut kuormitus. Sähkövarasto tai -varastot sijoitetaan tällöin fyysisesti lähelle kulutusta. Sähköä varastoidaan, kun verkon kuormitus on vähäinen, ja puretaan, kun verkko uhkaa ylikuormittua. (Denholm et al. 2011, 10–16.)

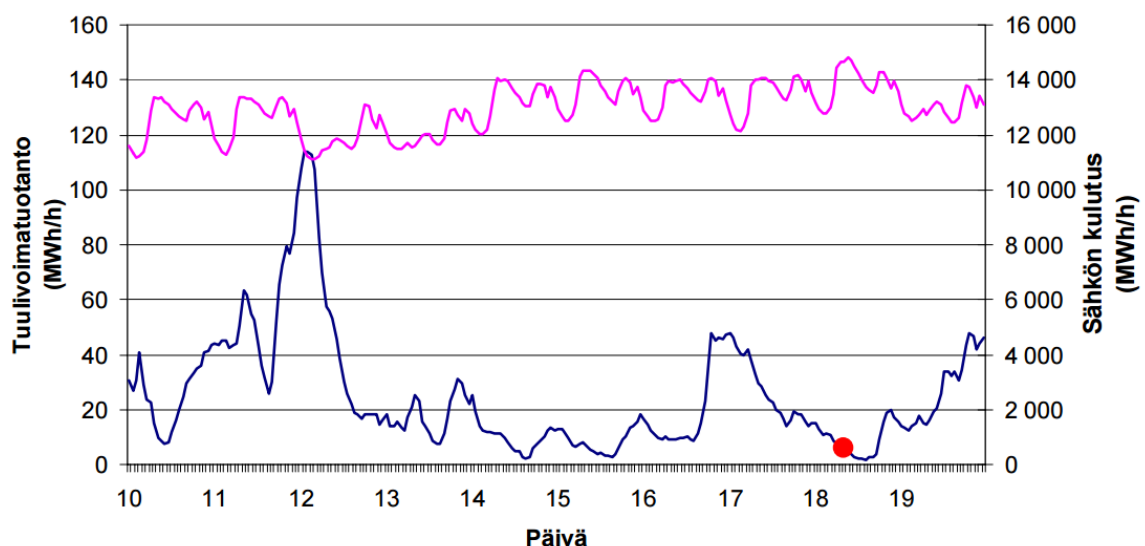
Sähkövarastoa voidaan käyttää myös apuna sähkön laadunhallinnassa. Varasto voi suojata herkkiä sähkölaitteita sähkön laatuongelmilta. Sähkön laatua voivat heikentää esimerkiksi jännitehuiput ja hetkelliset seisokit. Sähkövarastosta voi olla hyötyä myös sähkönkuluttajalle. Sähkövarasto tarjoaa vakaan sähkönlähteen verkon ulottumattomissa, esimerkiksi kesämökillä. Sähkönkuluttaja, joka maksaa sähköstään aikaperusteisesti (yö-/päiväsähkö) voi tehdä suuriakin säästöjä, kun varastoi halpaa sähköä ja purkaa sitä varastosta kalliin sähkön aikaan. Sähkövarasto voi toimia kuluttajalle myös

varasähkönlähteenä. Varastosta puretaan sähköä, kun sähkötoimitus verkosta on keskeytynyt. (Denholm et al. 2011, 10–16.)

3.2 Sähkövaraston rooli uusiutuvan energian tuotannossa

Uusiutuvien energiantuotantomuotojen avulla halutaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja sillä tavoin kasvihuonekaasupäästöjä. Tuuli- ja aurinkosähkö edustavat satunnaisesti vaihtelevaa uusiutuvaa energiaa (VRE eli *Variable Renewable Energy*), jonka tuotanto on ajoittaista ja epävarmaa. Näillä tuotantomuodoilla ei aina pystytä vastaamaan sähkön kysyntään. Silloin, kun sähkön kulutus on suuri, ei välttämättä tuule tai aurinko paista. (Denholm et al. 2011, 17–18.)

Kuvassa 4 nähdään tuulivoiman tuotanto ja sähkön kulutus Suomessa tunneittain helmikuussa 2011. Tuolloin tuulivoimakapasiteetti oli 193,3 megawattia. Kuvasta huomataan, ettei tuotanto tuona tarkasteluajana koskaan yllä lähellekään kapasiteettia vastaavaa energiamäärää. Huomataan myös, miten rajusti tuotanto vaihtelee peräkkäisinä tunteina, ja miten eri muotoisia tuotanto- ja kulutuskäyrät ovat.



Kuva 4. Tuulivoimatuotanto (vaaleanpunainen) ja sähkön kulutus (violetti) tunneittain Suomessa helmikuussa 2011 (MWh/h). Punainen piste kuvaa suurinta kulutushuippua. (Lähde: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2011/W178.pdf>.)

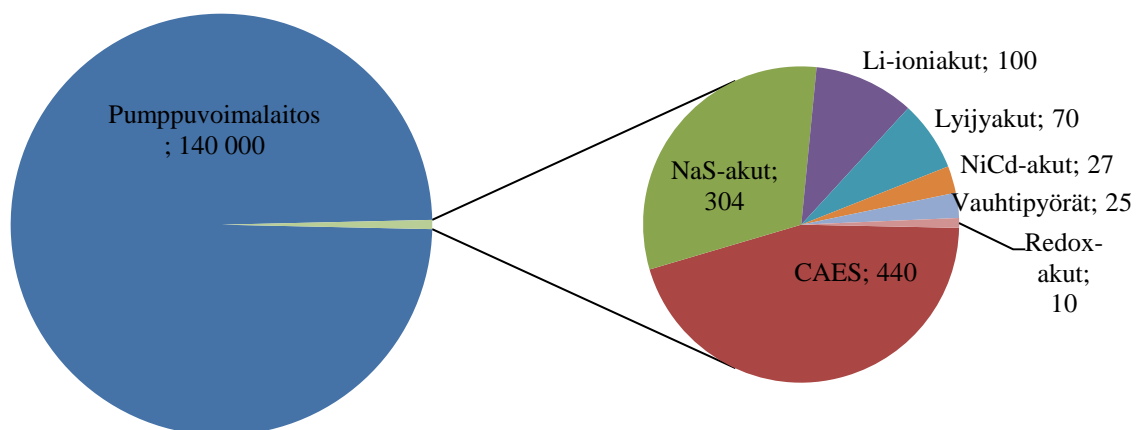
Kun tuuli- ja aurinkoenergiantuotantoa voimajärjestelmässä lisätään, sähköverkkoon syötetyn katkonaisen energian määrä kasvaa. Tämä lisää sähkön kysynnän ja tarjonnan epätasapainoa. Sähkövarasto voi auttaa VRE-tuotannon tasaamisessa ja toimia sen varavoimana. (Oberschmidt et al. 2013, 281–282.)

Kun sähkövaraston tehtävä on tasata VRE-tuotannon vaihtelua, varastointiajan tarve vaihtelee minuutista tuntiin. VRE:n varavoimana varastointitarve voi kasvaa yhteen viikkoon. VRE-tuotannon sähkövarastojen teho vaihtelee 100 kilowatista 10 megawattiin ja energia 10 kilowattitunnista 10 megawattituntiin. (Alanen et al. 2003, 98–103.)

4 SÄHKÖN VARASTOINNIN TEKNOLOGIAT

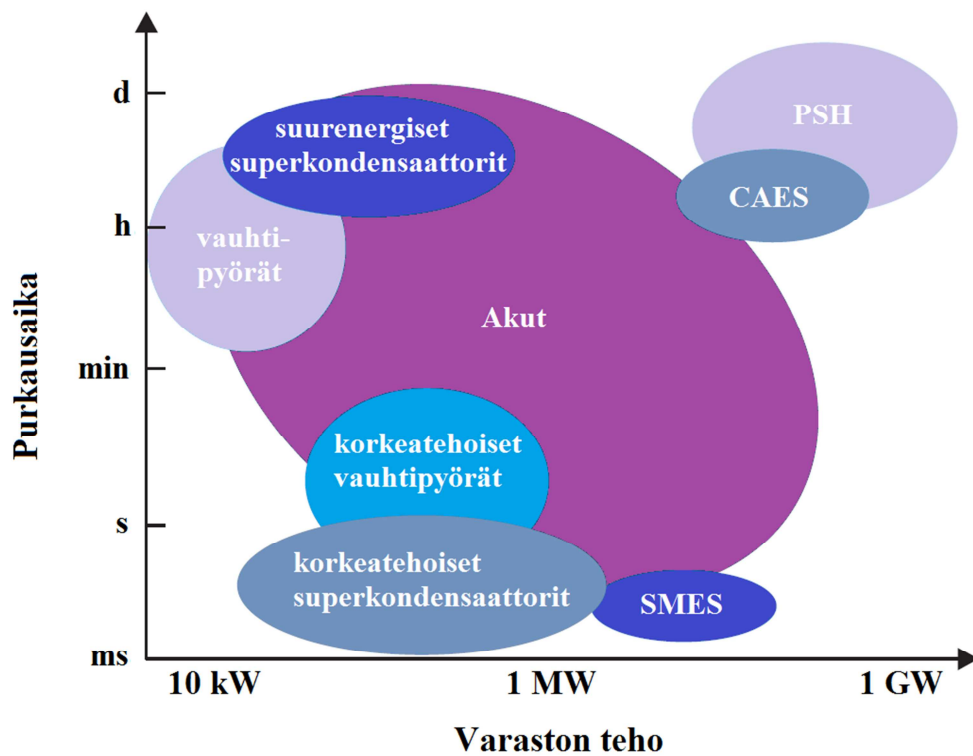
Tässä luvussa esitellään lyhyesti sähkön varastointiin käytettyjä teknologioita. Sähkön varastoteknologiat voidaan jakaa toimintaperiaatteensa mukaan mekaanisiin, sähkökemiallisiin, kemiallisiin ja sähköisiin varastoteknologioihin. Mekaanisia varastoja ovat pumppuvoimalaitos (PSH), paineilmaparasto (CAES) ja vauhtipyörä. Sähkökemiallisiin varastoihin voidaan lukea erilaiset akut. Kemiallisia varastoja edustavat vetyvarastot. Suprajohtavan magneettisen energian varasto (SMES) ja superkondensaattorit ovat sähköisiä varastoteknologioita. (Oberschmidt et al. 2013, 283.)

Kuvan 5 ympyräkaaviossa on esitetty arvio sähköverkkoihin liitettyjen sähkövarastojen kapasiteetista teknologioittain maailmanlaajuisesti. International Energy Agency (IEA 2014a, 16–17) arvio on kerätty eri lähteistä vuosilta 2010–2013. Sen mukaan sähkövarastokapasiteettia oli asennettuna sähköverkkoihin ainakin 140 gigawattia. Kapasiteetista 99 prosenttia koostui pumppuvoimalaitoksista ja loppu prosentti oli paineilmaparastoja, erilaisia akkuja ja vauhtipyöriä. Todellisuudessa kapasiteetti on arviota suurempi. Tarkkaa ja luotettavaa tietoa ei kuitenkaan ole avoimesti saatavilla kaikista valtioista.



Kuva 5. Sähköverkkoihin liitettyjen sähkövarastojen kapasiteetista (MW) suurin osa on pumppuvoimalaitoksia. (Lähde: IEA 2014a, 17.)

Kuvasta 6 nähdään, paljonko eri teknologioiden purkausajat ja -tehot eroavat toisistaan. Kun verrataan kuvaa 6 aiemmin esitettyyn kuvaan 3, voidaan päätellä, mihin sähkövoimajärjestelmän toimintaa tukeviin tehtäviin eri teknologiat soveltuvat purkausajan ja -tehon perusteella.

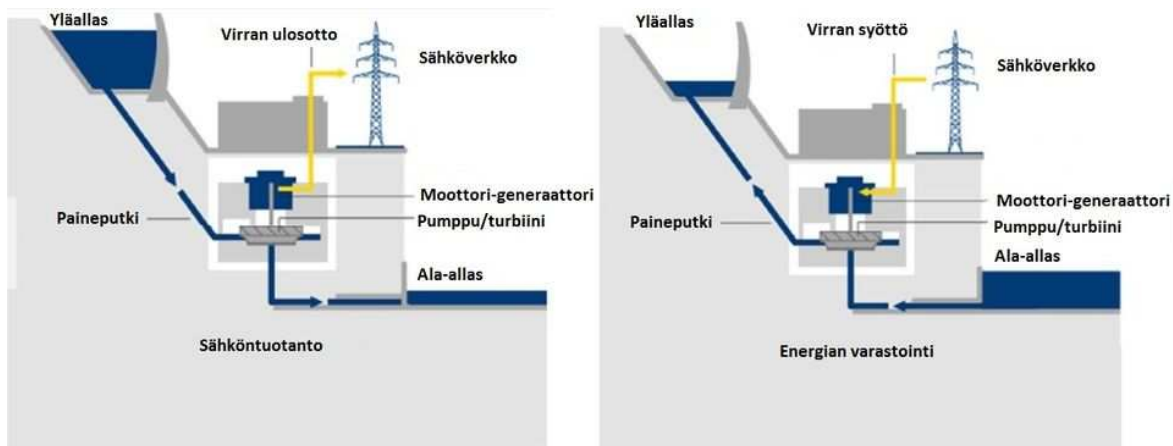


Kuva 6. Sähkövarastoteknologiat tarjoavat erilaisia purkausajoja ja -tehoja. (Lähde: IEA 2014b, 142.)

Pumppuvoimalaitos ja paineilmaparasto soveltuvat suuren tehon ja pitkän purkausajan vuoksi sähkövoimajärjestelmän kuormitusten tasaamiseen ja varavoimaksi. Pumppuvoimalaitosta voidaan hyödyntää pimeäkäynnistyksessä, ja paineilmaparastoa tasaamaan vuodenaajoista aiheutuvaa vaihtelua. Vauhtipyörää voidaan käyttää pienitehoisissa sovelluksissa varavoimana, takaamaan sähkön laatua ja tasaamaan VRE-tuotantoa. Akkujen käyttöalue on tarkastelluista teknologioista laajin, koska on paljon erilaisia akkuja, joiden ominaisuudet eroavat toisistaan. SMES soveltuu lyhytkestoisesti tasaamaan kuormituksia, takaamaan sähkön laatua ja toimimaan varavoimana. Superkondensaattoria voidaan käyttää VRE-tuotannon tasaukseen ja sähkön laadun takaamiseen. (Liite 1.)

4.1 Pumppuvoimalaitos (PSH)

Pumppuvoimalaitos (PSH eli *Pumped Storage Hydropower*) varastoi energian potentiaalienergiana. Sen toiminta perustuu kahden vesialtaan korkeuseroon (Kuva 7). Laitos koostuu altaiden lisäksi reversiibelistä turbiinigeneraattorista ja putkistosta. Alempana sijaitsevasta vesialtaasta pumpataan sähköä käyttäen vettä ylempään, kun sähkön hinta on matala. Kulutushuipun aikana sähköä tuotetaan laskemalla vettä turbiinin läpi takaisin alempaan altaaseen. (Rehman et al. 2015, 588–591.)



Kuva 7. Pumppuvoimalaitoksen periaatekuvassa on esitetty sähköntuotanto eli varaston purku ja energian varastointi. (Lähde: Yle 2015.)

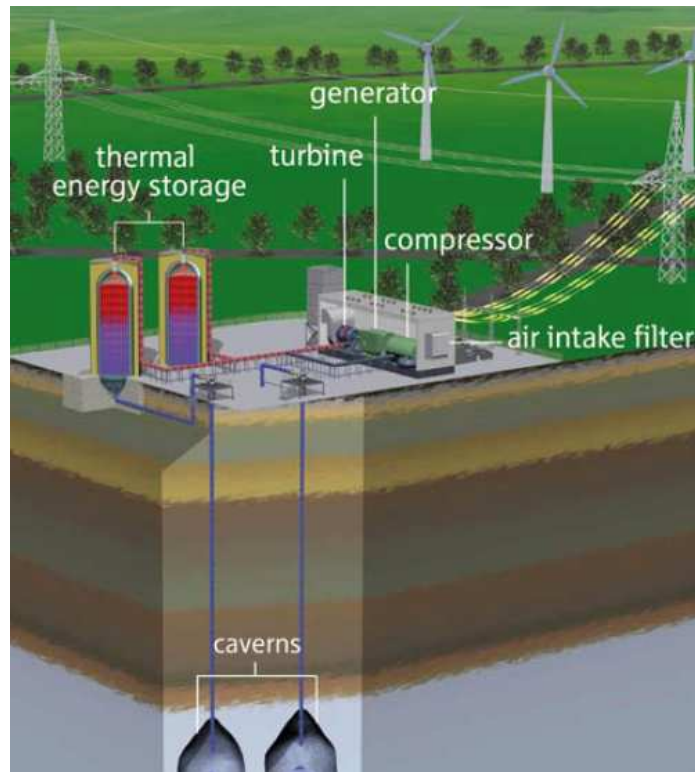
Pumppuvoimalaitoksen hyötysuhde on noin 70–80 prosenttia. PSH-laitos voidaan käynnistää ja pysäyttää vain muutamassa sekunnissa. Sen teho voi olla muutamasta kilowatista yli 10 megawattiin. Koska varaston energiatiheys ei ole suuri, on joko vesialtaan kokoa tai altaiden välistä korkeuseroa kasvatettava todella paljon, jotta laitoksen teho kasvaisi suureksi. (Rehman et al. 2015, 588–591.)

Pumppuvoimalaitosinvestoinnissa haastavinta on sopivan sijoituspaikan löytäminen. Pinnanmuodoiltaan sopivia sijoituspaikkoja on vaikea löytää ja maanmuokkaus kasvattaa investointikustannuksia nopeasti. Tulevaisuudessa pumppuvoimalaitoksia rakennetaan todennäköisesti rannikoille, mutta tällä hetkellä suolaveden vaatimat materiaalit ovat liian kalliita. (Oberschmidt et al. 2013, 283; 306.)

4.2 Paineilmavarasto (CAES)

Lyhenne CAES tulee sanoista *Compressed Air Energy Storage* ja tarkoittaa paineilmavarastoa. CAES-laitoksessa ilmaa puristetaan kompressorilla mekaanisesti, kun sähkön kulutus on vähäistä ja hinta matala. Puristettu ilma säilötään joko luonnolliseen geologiseen muodostumaan tai kallioon louhittuun onkaloon. (Alanen et al. 2003, 44.) Sähkön hinta- ja kulutushuipun aikana paineilmalla tuotetaan sähköä kaasuturbiinissa. Teknologian huono puoli on se, että kylmä paineilma on lämmitettävä ennen paisumista polttamalla esimerkiksi maakaasua. (Oberschmidt et al. 2013, 283–284.)

Saksalainen energiayhtiö RWE (2010) on kehittämässä ADELE-nimistä paineilmavarastosovellusta, joka ei käytä polttoainetta paineilman lämmittämiseen ja on siten hiilidioksidivapaa. Sovelluksen nimi tulee sanoista *Adiabatic compressed-air project for electricity supply*. ADELE:n puristusvaiheessa syntyvää lämpöä ei päästetä hukkana ympäristöön vaan kuuma paineilma johdetaan ennen varastointia lämpövarastoon, jossa lämpö varastoituu kiviin tai keraamisiin tiiliin. Varastoitu lämpö käytetään purkuvaiheessa lämmittämään paineilma ennen paisutusta. Prosessi ei ole nimensä mukaisesti adiabaattinen, mutta RWE:n tavoitteena on ylittää 70 prosentin prosessihyötysuhteeseen. Sovelluksen suurimmat haasteet ovat materiaalien valinnassa, eristyksessä ja tiiveydessä. ADELE-koelaitoksen on määrä valmistua aikaisintaan vuonna 2016. Laitoksen periaatekuva on esitetty alla (Kuva 8). (RWE 2010.)



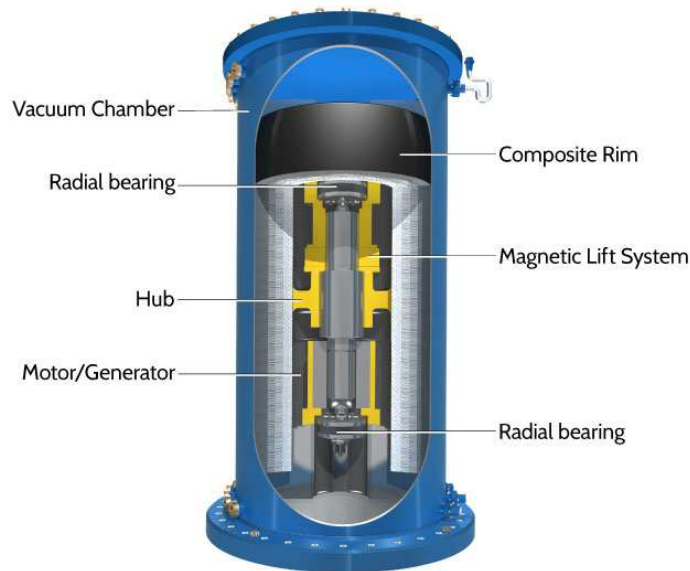
Kuva 8. ADELE-laitoksen periaatekuvassa nähdään generaattorin kanssa samalla akselilla olevat kompressori ja turbiini sekä maanpäällinen lämpö- ja maanalainen paineilmaparasto. (Lähde: RWE 2010.)

4.3 Vauhtipyörät

Energian varastoinnin vanhimpia sovelluksia ovat vauhtipyörät. Ne varastoivat liike-energiaa. Teknologiassa hyvää on se, että vauhtipyörän energiavarasto voidaan purkaa aivan tyhjäksi. Koska pyörän nopeus hidastuu purettaessa ja nopeutuu ladattaessa, on vauhtipyörään liitettävä taajuusmuuttaja tasaamaan taajuuden vaihtelua. Vauhtipyörän hyötysuhteeseen vaikuttavat pyörän muoto, materiaali ja laakerointi. Perinteinen vauhtipyörä on teräskiekkko. Kehittyneemmässä vauhtipyörässä materiaalina käytetään komposiittimateriaaleja. (Alanen et al. 2003, 66–75)

Yhdysvaltalaisen Beacon Powerin kaupallinen vauhtipyöräenergiavarasto on esitetty kuvassa 9. Vauhtipyörä on valmistettu hiilikuitukomposiitista. Pyörän kanssa samalle akselille on kytketty moottorigeneraattori, joka varastoa ladattaessa ottaa sähköä verkosta ja kiihdyttää pyörää. Kun varastoa puretaan, pyörä pyörittää generaattoria tuottaen sähköä.

Vauhtipyörä pyörii aina samaan suuntaan. Tämän ansiosta vauhtipyörä voi siirtyä nopeasti purkaus- ja latausvaiheiden välillä. (Beacon Power 2014.)



Kuva 9. Vauhtipyöräenergiavaraston läpileikkauskuva. (Lähde: Beacon Power 2014.)

Beacon Powerin vauhtipyörän roottori on suljettu säiliöön, jossa vallitsee tyhjiö. Magneettisen järjestelmän synnyttämä magneettikenttä ja laakerit tukevat roottoria. Tyhjiö, magneettikenttä ja laakerit yhdessä vähentävät järjestelmän kitkaa, mikä parantaa hyötysuhdetta ja estää osien kulumista. (Beacon Power 2014.)

4.4 Akut

Vanhin energian varastointimuoto on sähkökemiallinen akku. Akut ovat sekundäärisiä virtalähteitä eli ne ovat uudelleen ladattavia. Akut voidaan jaotella tehoakkuihin, jotka sopivat tuottamaan lyhyitä tehopiikkejä, ja energia-akkuihin, joista voi purkaa suuren energiamäärän pidemmällä aikavälillä. Akkujen kehitystyö ja kaupallistaminen on hidasta, koska niiden käyttöikätestit kestävät vuosia. (Alanen et al. 2003, 48–49.) Taulukkoon 2 on koottu viiden eri akkutyypin ominaisuuksia.

Taulukko 2. Akkujen ominaisuuksia. (Lähde: Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 317.)

Akku	Teho	Purkausaika	Hyötysuhde	Käyttöikä
Litiumioni-	5 MW	15 min–muutama tunti	90 %	15 vuotta
Lyijy-	3–20 MW	10 s–muutama tunti	70–80 %	4–8 vuotta
Natrium-rikki-	35 MW	8 h	80–85 %	15 vuotta
Vanadium-redox-	4 MW	4–8 h	63–80 %	10 vuotta
Sinkki-ilma-	20 kW–10 MW	3–4 h	40–60 %	muutama sata lataus/purkauskierrosta

Litiumioniakuilla on muita akkuja suurempi energiatiheys. Sen hyötysuhde on melkein 100 prosenttia ja käyttökertaikä todella pitkä. Litiumioniakun itsepurkaustaso on matala eli se sopii hyvin pitkäaikaiseen varastointiin. Litiumioniakun purkauskyyky heikkenee, kun akkua ei pureta täydellisesti ja sen jälkeen ladataan uudestaan. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309–312.)

Lyijyakut ovat edullisia, mutta huonon kestävyuden ja vaihtelevasta purkautumisnopeudesta riippuvan energiamäärän vuoksi ne soveltuvat huonosti energiahuoltoon. Metallilma-akut ovat ympäristöystävällisiä, halpoja ja niillä on suuri energiatiheys. Niiden uskotaan akuista parhaiten sopivan energian varastointiin. Uudelleenlatauksen hyötysuhde on kuitenkin huono ja käyttöikä lyhyt, joten kehitettävää vielä on. Markkinoilla on jo sinkki-ilma-akkuja. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309–318.)

Käytetyin korkean lämpötilan akku on natrium-rikkiakku (NaS). Sen hyötysuhde on 89 prosenttia ja energiatiheys on suuri. Esimerkiksi Japanissa on käytössä natrium-rikkiakku, jonka teho on 34 megawattia ja energiasisältö 245 megawattituntia. Teknologian huono

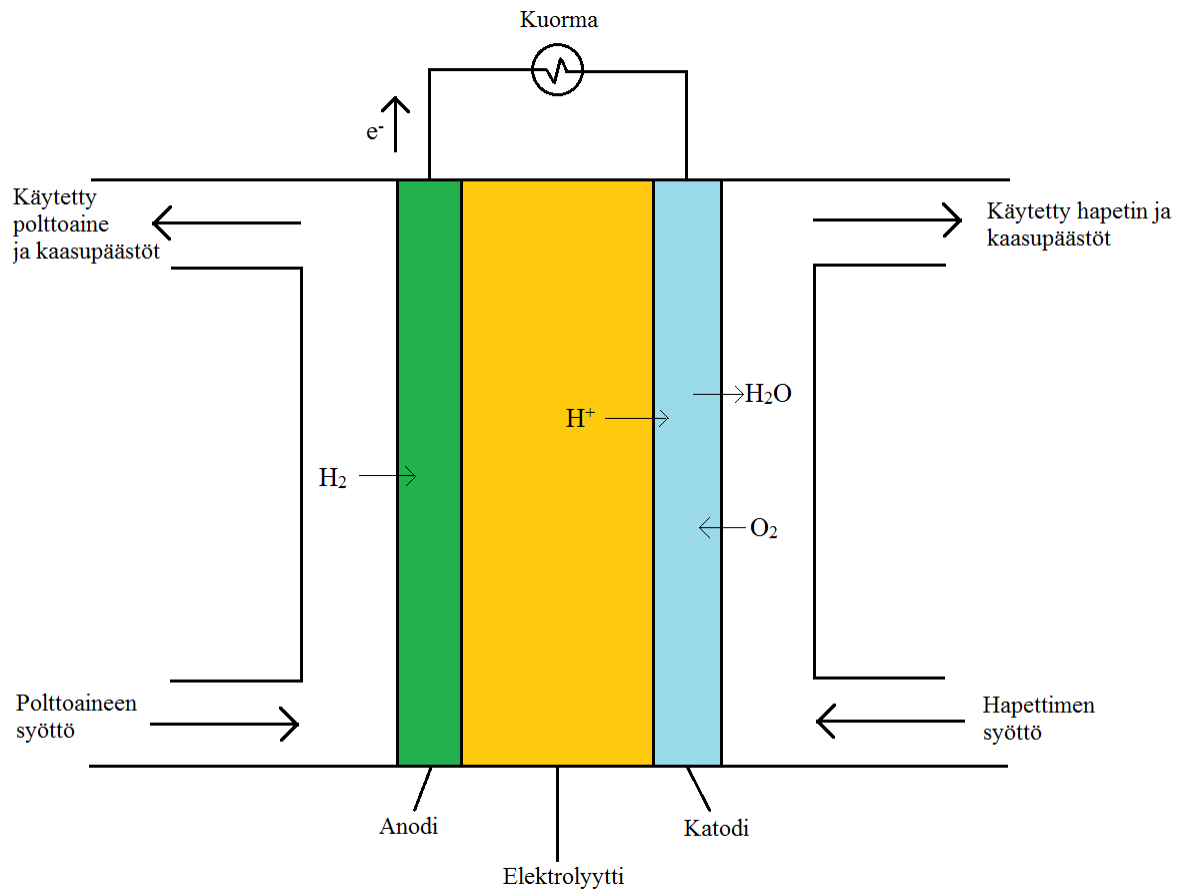
puoli on turvallisuusuhka, jonka herkästi reagoiva natrium aiheuttaa. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309–312.)

Markkinoiden kehittynein virtausakku lienee vanadium-redox-akku, jolla on hyvä hyötysuhde ja joka toimii energia-akkuna. Vanadium-redox-akun energiatiheys on kuitenkin pieni. Sen paras ominaisuus on pitkä käyttökertaikä. Akun voi purkaa ja ladata lukemattomia kertoja lähes ilman häviöitä. (Guerrero-Lemus & Martínez-Duart 2013, 309–312.)

4.5 Vetyvarasto

Vetyvarasto on synteettisen polttoaineen varasto. Vedyn energiatiheys massaa kohti on korkea. Vetyä saadaan, kun vettä hajotetaan sähkökemiallisesti vedyksi ja hapeksi. Normaalioloissa kaasuna esiintyvä vety varastoidaan joko paineistettuna tai nesteytettynä. Vedyn tiivistäminen nesteolomuotoon vaatii paljon energiaa. Paineistus ja tiivistys kasvattavat vedyn energiatheyttä tilavuusyksikköä kohti. Paineistettu vetykaasu säilötään metallisäiliöön maan päällä tai maan alla. (Alanen et al. 2003, 45–47.)

Vetyvarasto puretaan tuottamalla sähköä polttokennon avulla. Sähkökemiallisessa prosessissa anodilla vety hajoaa vapauttaen elektroneja ja katodilla vety, happi ja elektronit muodostavat yhtyessään vettä (Kuva 10). Prosessissa vapautuu lämpöä. Polttokennon elektrolyytinä voi toimia fosforihappo, sulakarbonaatti, keraaminen materiaali, kaliumhydroksidi tai polymeeri. (Alanen et al. 2003, 55–57.)



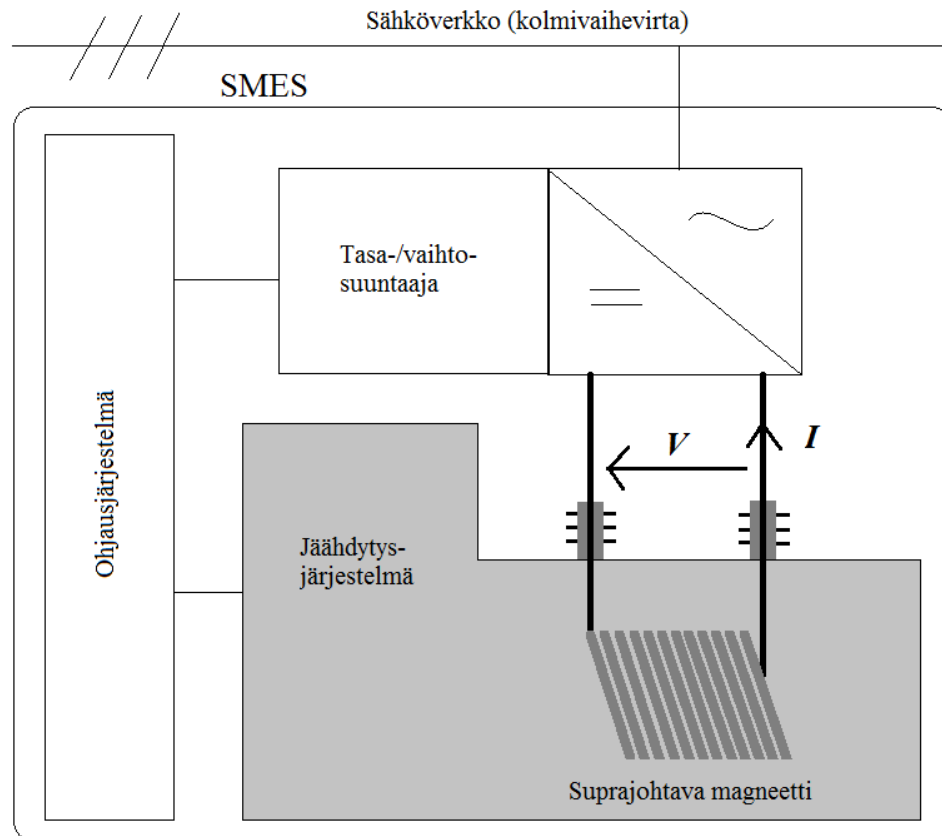
Kuva 10. Polttokennon periaatekuva. (Lähde: VTT 2003, 56.)

4.6 Suprajohtava magneettisen energian varasto (SMES)

Suprajohtavan magneettisen energian varaston (SMES eli *Superconducting Magnetic Energy Storage*) kelassa kiertää tasavirta. Virta synnyttää magneettisen kentän, johon energia varastoituu. Johdinmateriaalin, josta kela muodostuu, on oltava suprajohtavaa. Siinä sähkövirta kulkee häviöttömästi, koska johtimen resistanssi on lähes olematon. Perinteisessä johtimessa resistanssi vastustaa sähkövirtaa, joka muuttuu hetkessä lämmöksi. (Tixador 2013, 442–449.)

Kuvassa 11 on esitetty sähköverkkoon kytketyn SMES-järjestelmän periaatekuva. Järjestelmä koostuu suprajohtavasta magneetista, jäähdytysjärjestelmästä, ohjausjärjestelmästä ja tasa-/vaihtosuuntaajasta. Jäähdytysjärjestelmän tehtävä on laskea johtimen lämpötila alle kriittisen pisteen, jossa suprajohtava tila syntyy. Matalan lämpötilan suprajohteiden kriittinen piste on lähellä nollaa kelviniä ja korkean lämpötilan

suprajohteiden lähempänä 100 kelviniä. Mitä matalampi lämpötila vaaditaan sitä kalliimpi jäähdytysjärjestelmä on toteuttaa. (Tixador 2013, 442–449; 460–464.)



Kuva 11. SMES-järjestelmä voidaan liittää sähköverkkoon ohjausjärjestelmän ja tasa-/vaihtosuuntaajan avulla. (Lähde: Tixador 2013, 447.)

Magneetista purettava virta on tasavirtaa, joka täytyy muuntaa vaihtosuuntaajalla eli invertterillä vaihtovirraksi ennen sähköverkkoon syöttämistä. Vastaavasti tasasuuntaaja muuntaa verkosta saatavan vaihtovirran tasavirraksi magneettia ladattaessa. Virta pienenee purettaessa varastoa. Konvertteri aiheuttaa merkitsevän osan SMES-järjestelmän kustannuksista. SMES-järjestelmä on enemmän tehonlähde kuin energialähde. Sen teho voi olla 100 megawattia purkausajan ollessa muutaman sekunnin luokkaa. (Tixador 2013, 442–450.)

4.7 Superkondensaattorit

Superkondensaattori eli kaksikerroskondensaattori muodostuu kahdesta johdinlevystä, joilla on erimerkkiset varaukset ja jotka on eristetty toisistaan. Elektrodien välille syntyy sähkökenttä, johon energia varastoituu. Elektrodimateriaalina käytetään hiiltä tai hiilikuitua (Alanen et al. 2003, 80–84). Sähkön varastointi superkondensaattoriin ja sen purku on nopeaa. (IEA 2014a, 20.)

Superkondensaattorit, joita myös ultrakondensaattoreiksi kutsutaan, soveltuvat parhaiten sähkövarastoiksi sovelluksiin, joissa vaaditaan suurta tehoa. Ne voivat esimerkiksi toimia varavoimana uusiutuvalle energialle ja varmistaa sähkön laatua. Sähkövaraston kokoa voidaan kasvattaa kytkemällä superkondensaattoreita yhteen suuriksi yksiköiksi. (Alanen et al. 2003, 80–84; Maxwell Technologies 2014.)

5 SÄHKÖVARASTON INVESTOINTIKUSTANNUKSET

Vaikka sähkövaraston ainoa tarkoitus ei olekaan tuottaa voittoa, on varaston pystyttävä kilpailemaan kannattavuudessa perinteisten sähköntuotantomuotojen kanssa. Sähkövarastojen investointikustannukset ovat yleisesti suuria, mutta vaihtelevat eri sovellusten välillä paljon. Käyttö- ja kunnossapitokustannukset sen sijaan ovat pienet. Tällä hetkellä sähkövaraston investointikustannukset ovat joko yhtä suuret tai suuremmat kuin saman tehoisen voimalaitoksen investointikustannukset. Kustannusarviot saman varastoteknologian sisällä vaihtelevat suuresti. Kustannuksia voidaan tarkastella energiayksikköä tai tehoyksikköä kohden (€/USD /kW tai €/USD /kWh). (IEA 2014b, 145–148.)

Kirjallisuuden sähkövarastojen investointikustannusarviot vaihtelevat suuresti. Tämä johtuu siitä, että kaupalliseen käyttöön rakennettuja varastoja on vielä vähän. IEA:n (2014a) mukaan sähkövarastojen investointikustannukset ovat 130–4600 yhdysvaltain dollaria kilowattia kohti. Seuraavassa taulukossa (3) on esitetty eri varastoteknologioiden investointikustannukset dollareina kilowattia kohti.

Taulukko 3. Sähkövarastojen investointikustannukset kilowattia kohti. (Lähde: IEA 2014a, 18–19.)

Varastoteknologia	Investointikustannus [USD/kW]	Ensisijainen sovelluskohde
Pumppuvoimalaitos	500–4600	pitkäaikainen varasto
CAES	500–1500	pitkäaikainen varasto, arbitraasi
Akut	300–3500	hajautettu tuotanto, lyhytaikainen varasto
Vetyvarasto	500–750	pitkäaikainen varasto
Vauhtipyörät	130–500	lyhytaikainen varasto
Superkondensaattorit	130–515	lyhytaikainen varasto
SMES	130–515	lyhytaikainen varasto

Taulukosta nähdään, että pitkäaikaiseen energianvarastointiin käytettävien teknologioiden, pumppuvoimalaitoksen ja paineilmavaraston, investointikustannukset ovat edellisessä kappaleessa esitellyistä teknologioista suurimmat. Niiden investointikustannukset riippuvat pitkälti sijoituspaikasta ja sen pinnanmuodoista. Investointikustannukset nousevat nopeasti, jos altaat ja onkalot joudutaan rakentamaan tyhjästä. Pienimmät investointikustannukset ovat lyhytaikaiseen energianvarastointiin käytettävillä teknologioilla, joita ovat vauhtipyörät, superkondensaattorit ja SMES. Vetyvaraston investointikustannukset ovat hiukan lyhytaikaisten varastosovellusten kustannuksia suuremmat. Akkujen investointikustannukset vaihtelevat suuresti riippuen käytetyistä materiaaleista ja tekniikan tuoreudesta.

Korkeat kustannukset ovat suurin hidaste sähkövarastojen käyttöönotolle voimajärjestelmissä. Korkeiden kustannusten vuoksi sähkövarastoja otetaan käyttöön vasta silloin, kun kustannustehokkaammat ratkaisut on jo hyödynnetty. On laskettu, että sähkövarastojen kustannustehokkuus nousee kilpailukykyiseksi vasta silloin, kun

satunnaisesti vaihtelevan uusiutuvan energian (VRE) markkinaosuus on todella suuri, lähes 50 prosenttia. (IEA 2014b, 145–148.)

Sähkövarastoja ei tulisi yleisesti hylätä liian kalliina sovelluksina. Sähkövarastojen käyttöönottoa voidaan nopeuttaa lisäämällä sähkön varastoinnin avainteknologioiden tutkimusta ja kehitystä. Kehitys laskee teknologioiden investointikustannuksia. (IEA 2014b, 145–148.)

6 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön kirjallisuuskatsauksen tavoitteena oli selvittää, mitä sähkön varastointi on, miksi ja missä tilanteissa sähköä kannattaa varastoida ja millaisilla teknologioilla se käytännössä toteutetaan. Sähkövarastoja tarkasteltiin erityisesti sähkövoimajärjestelmän hallinnan ja satunnaisesti vaihtelevan uusiutuvan energian tuotannon näkökulmista.

Sähkövarasto on energiavarasto. Siihen voidaan varastoida energiaa, josta merkittävä osa on myöhemmin purettavissa käyttöön. Sähkövarastolle on lukuisia tehtäviä sähkövoimajärjestelmässä. Se voi auttaa kulutuksen ja tuotannon tasapainon eli taajuuden ylläpidossa. Sähkövarastolla voidaan tasoittaa kulutushuippuja ja varmistaa sähkön laatua. Sähkövarasto auttaa liittämään satunnaisesti vaihtelevaa uusiutuvaa energiaa osaksi sähkövoimajärjestelmää. Sen avulla voidaan siis lisätä aurinko- ja tuulisähkön osuutta energiantuotannosta. Varastoja voidaan hyödyntää myös varavoimana.

Sähkövarastoja on mekaanisia, sähkökemiallisia, kemiallisia ja sähköisiä. Tässä työssä esiteltiin varastoteknologioista lyhyesti pumppuvoimalaitos, paineilmavarasto, vauhtipyörä, akut, vetyvarasto, suprajohtavan magneettisen energian varasto ja superkondensaattori. Maailmanlaajuisesti sähköverkkoon liitettyjen sähkövarastojen kapasiteetista 99 prosenttia on pumppuvoimalaitoksia. Eri teknologioilla on erilaiset ominaisuudet, joiden perusteella ne soveltuvat eri tehtäviin sähkövoimajärjestelmässä.

Sähkövarastojen ongelmana on kallis hinta. Niiden täytyy kilpailla taloudellisessa kannattavuudessa perinteisten sähköntuotantomuotojen kanssa. Sähkövaraston investointikustannukset ovat tällä hetkellä vähintään yhtä suuret kuin samankokoisen perinteisen voimalaitoksen. Varastojen laajaa käyttöönottoa hidastavatkin teknologioiden korkeat investointikustannukset. Käyttö- ja kunnossapitokustannukset ovat kuitenkin pienet verrattuna perinteisiin voimalaitoksiin. Sähkövarastojen käyttöönottoa tulisi nopeuttaa lisäämällä sähkövarastojen tutkimusta ja kehitystä.

LÄHDELUETTELO

Alanen, R. et al. 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT Tiedotteita 2199. ISBN 951-38-6160-0

Alanen, R. & Hätönen, H. 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta. VTT Working Papers 52. [verkkójulkaisu][viitattu 27.2.2015] Saatavissa: <http://www2.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/W52.pdf>. ISBN 951-38-6604-1

Beacon Power 2014. Carbon Fiber Flywheels. [www-sivusto][viitattu 15.4.2015] Saatavissa: <http://beaconpower.com/carbon-fiber-flywheels/>

Da Rosa, A.V. 2013. Fundamentals of renewable energy processes. 3.painos. Amsterdam: Academic Press. ISBN 978-0-12-397219-4

Denholm, P. et al. 2011. The Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation. Teoksessa: Bowen, J.M. Energy Storage: Issues and Applications. s. 1–58. New York: Nova Science Publishers, Inc. ISBN 978-1-61209-517-2

Energiäteollisuus 2015. [www-sivusto] [viitattu 13.5.2015] Saatavissa: <http://energia.fi/energia-ja-ymparisto/sahkontuotanto>

ESA Energy Storage Association. [www-sivusto] [viitattu 9.4.2015] Saatavissa: <http://energystorage.org/energy-storage>

Fingrid Oyj. [verkkójulkaisu] [viitattu 8.4.2015] Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/Sivut/default.aspx>

Guerrero-Lemus, R. & Martínez-Duart, J.M. 2013. Electricity Storage. Teoksessa: Renewable Energies and CO₂. Cost Analysis, Environmental Impacts and Technological Trends- 2012 Edition. s. 307–333. London: Springer. Lecture Notes in Energy 3. ISBN 978-1-4471-4385-7 (eBook)

Hoffman, K. et al. 2004. Suomen nykyinen energiajärjestelmä. Teoksessa: Kara, M. et al. Energia Suomessa. s. 43–90. 3.painos. Helsinki: Edita. ISBN 951-37-4256-3

IEA 2014a. Technology Roadmap: Energy Storage. [verkkójulkaisu] [viitattu 27.2.2015]
Saatavissa:

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyStorage.pdf>

IEA 2014b. The Power of Transformation: Wind, Sun and the Economics of Flexible Power Systems. ISBN 978-92-64-20803-2

Maxwell Technologies 2014. Maxwell ultracapacitors. [tuote-esite] [viitattu 26.5.2015]
Saatavissa:

http://www.maxwell.com/images/documents/Ultracapacitors_Overview_Flyer_3000615-2EN.pdf

Nord Pool Spot 2015. Historical Market Data. [tilasto] Saatavissa:

<http://www.nordpoolspot.com/historical-market-data/>

Oberschmidt, J., Klobasa, M. & Genoese, F. 2013. Techno-economic analysis of electricity storage systems. Teoksessa: Melhem, Z. Electricity transmission, distribution and storage systems. s. 281–308. Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-784-6

Rehman, S., Al-Hadhrami, L.M. & Alam, Md.M. 2015. Pumped hydro energy storage system: A technological review. s. 586–598. Renewable & Sustainable Energy Reviews. Volume 44.

RWE Power 2010. Adele – Adiabatic compressed-air energy storage for electricity supply. [tuote-esite] [viitattu 30.3.2015] Saatavissa:

<http://www.rwe.com/web/cms/mediablob/en/391748/data/364260/1/rwe-power-ag/innovations/Brochure-ADELE.pdf>

SANDIA 2007. Long vs. Short-Term Energy Storage: Sensitivity Analysis.
[verkkajulkaisu] [Viitattu 27.2.2015] Saatavissa: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2007/074253.pdf>

Tixador, P. 2013. Superconducting magnetic energy storage (SMES) systems. Teoksessa: Melhem, Z. Electricity transmission, distribution and storage systems. s. 442–477. Cambridge: Woodhead Publishing. ISBN 978-1-84569-784-6

Yle 2015. [uutinen] [viitattu 27.2.2015] Saatavissa:
http://yle.fi/uutiset/kasivarren_pumppuvoimala_rakennetaan_aikaisintaan_2017/7305302

Liite 1. Sähkön varastointisovellusten ominaisuuksia ja soveltuvia teknologioita.

(Lähde: Alanen et al. 2003, 104–106.)

	Teho	Varastointi aika	Energia	Vasteaika	Soveltuvat teknologiat
Sähkön laatu	≤ 1 MW	sekunteja	~0,2 kWh	< 1/4 sykliä	Vauhtipyörä Superkondensaattori SMES Lyijyakku Vety polttokenno
Varavoima	1–100 MW	≤ 30 min	5000–50000 kWh	< 3 s tai < 10 min	Vauhtipyörä Lyijyakku Kehittyneet akut SMES CAES PHS
VRE-tuotannon tasaus	-10 MW	min–1 h	10–10000 kWh	< 1 sykli	Vauhtipyörä Superkondensaattori Lyijyakku Kehittyneet akut Vety polttokenno
Sähkön tuotanto, Kuormitusten tasaus	satoja MW	6–10 h	100–1000 MWh	minuutteja	SMES Lyijyakku Kehittyneet akut PHS CAES Vety polttokenno
Hätä-varavoima	1 MW	24 h	24 MWh	s–min	Lyijyakku Kehittyneet akut CAES PHS Vety polttokenno
VRE-tuotannon varavoima	0,1–1 MW	-7 vrk	20–200 MWh	s–min	Lyijyakku Kehittyneet akut CAES PHS Vety polttokenno
Vuodenaikojen vaihtelun tasaus	50–300 MW	viikkoja	10-100 GWh	minuutteja	CAES