

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0202 Energiatekniikan kandidaatintyö

MEKAANISET ENERGIAVARASTOT

Mechanical Energy Storage Systems

Työn tarkastaja: Ahti Jaatinen-Värri

Työn ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri

Lappeenranta 21.04.2019

Santeri Honkanen

TIIVISTELMÄ

Opiskelijan nimi: Santeri Honkanen

School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Opinnäytetyön ohjaaja: Ahti Jaatinen-Värri

Mekaaniset energiavarastot

Kandidaatintyö 2019, 39 sivua, 10 kuvaa ja 2 taulukkoa

Hakusanat: Energian varastointi, PHSS, CAES, vauhtipyörät

Mekaaniset energiavarastot ovat tällä hetkellä käytetyin energianvarastointimenetelmä. Mekaanisia energiavarastoja ovat pumpatut vesivarastot, painovoimavarastot, vauhtipyörät ja paineilmaparastot. Mekaanisessa varastoinnissa sähkö muutetaan potentiaali tai liike-energiaksi. Työn tavoitteena oli selvittää mekaanisten energiavarastojen toimintaperiaatteet ja niiden toimivuus energiasektorilla.

Suurin osa mekaanisista energiavarastoista soveltuvat erityisen hyvin suurien energiamäärien pitkäaikaiseen varastointiin. Poikkeuksena ovat vauhtipyörät, joilla on mahdollista varastoida pieniä määriä energiaa hetkellisesti. Mekaanisten energiavarastojen etuina on teknologioiden yksinkertaisuus, pitkäikäisyys ja korkea hyötysuhde. Mekaanisten energiavarastojen heikkoutena ovat suuret kokonaiskustannukset, joidenkin teknologioiden asettamat maantieteelliset rajoitukset ja yleensä alhaiset energiatiheddet verrattuna muihin varastointimenetelmiin.

Mekaaniset energiavarastot soveltuvat erityisen hyvin sähköverkon taajuuden säätöön, käynnistysavuksi verkon tai voimalaitoksen toimintahäiriöissä, pitkäaikaiseen energianvarastointiin, huippukuormituksen tasoittamiseen ja peruskuormaksi. Mekaanisten energiavarastojen avulla voidaan korvata fossiilisia energianlähteitä ja ne tarjoavat päästöttömiä varastointimenetelmiä energiasektorille. Varastojen kilpailukyky ja ympäristöystävällisyys riippuu kuitenkin siitä, miten varastoitu sähkö on tuotettu. Mekaaniset energiavarastot tulevat olemaan tärkeä osa tulevaisuuden energiasektoria.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Sisällysluettelo

Lyhenneluettelo	4
1 Johdanto	5
2 Pumpatut vesivarastot	9
2.1 Painovoimatekniikat	14
3 Vauhtipyörät	16
4 Paineilmavarastot	20
4.1 Polttoaineella toimivat paineilmavarastot	21
4.2 Adiabaattinen paineilmavarasto	25
4.3 Isoterminen paineilmavarasto	28
4.4 Pienen kokoluokan paineilmavarastot	29
5 Mekaaniset energiavarastot osana tulevaisuuden energiasektoria	31
5.1 Energiasektori	31
5.2 Sähkön hinta	33
5.3 Energiaturvallisuus	35
6 Johtopäätökset	37
Lähdeluettelo	40

LYHENNELUETTELO

AA-CAES Advanced Adiabatic Energy Storage System

CAES Compressed Air Energy Storage

D-CAES Diabatic Compressed Air Energy Storage

FES Flywheel Energy Storage

I-CAES Isothermal Compressed Air Energy Storage

PHSS Pumped Hydroelectric Storage System

SMES Superconducting Magnetic Energy Storage

1 JOHDANTO

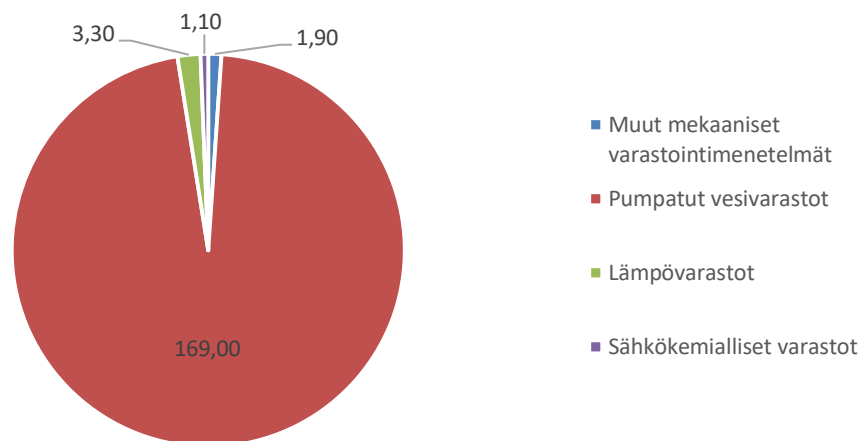
Tulevaisuudessa uusiutuvan energian osuus maailmassa kasvaa. Todisteena tästä ovat muun muassa useat kansainvälisesti tehdyt sopimukset, joiden seurauksena valtiot pyrkivät vähentämään kasvihuonepäästöjä useilla osa-alueilla, kuten energiantuotannossa. Pariisin sopimuksen tarkoituksena on saada rajoitettua maapallon keskilämpötilan nousu alle 1,5 asteeseen esiteolliseen aikakauteen verrattuna (Ympäristöministeriö 2018). Tavoitteisiin päästään tehostamalla energiantuotantoa ja korvaamalla fossiililla polttoaineilla tuotettua energiaa esimerkiksi uusiutuvilla energialähteillä. International Energy Agency (IEA 2019a) tekemän tutkimuksen mukaan uusiutuvien energianlähteiden osuus sähköntuotannossa vastaa 30 % sähkön kokonaiskysynnästä vuoteen 2023 mennessä. EU:n poliittisen strategian keskuksen mukaan vain Euroopassa tullaan pääsemään reiluun 30 %:iin, ja kansainvälisesti uusiutuvan energian osuus tulee olemaan vain 12,4 %. Kansainvälisellä tasolla 12,4 %:iin pääseminen tarkoittaa noin 920 gigawatin nimellistehon lisäystä lähinnä tuuli- ja aurinkovoimaan ympäri maailmaa (European Political Strategy Centre 2018, 4).

Uusiutuvan energian osuuden kasvamisen mukana syntyy kuitenkin uusia haasteita, joita aiheuttaa esimerkiksi tuulivoiman riippuvuus sääolosuhteista. Energiantuotannon varmuuden parantamiseksi tarvitaan tästä syystä yhä enemmän varastointikapasiteettia ja parempia tapoja varastoida energiaa. Energiavarastojen tarvetta lisää myös yhteiskunnan riippuvuus sähköstä ja tarkemmin sanottuna teknologiasta, joka toimii sähköllä. Sähkön varastoiminen vahvistaa energiaturvallisuutta parantamalla sähkön saatavuutta vuorokauden kaikkina aikoina. Nykyisin sähkön suora varastointi ei ole tarpeeksi kannattavaa, joten sähköä varastoidaan pääsääntöisesti muihin muotoihin, kuten muuttamalla potentiaali- tai liike-energiaksi (Yucekaya 2015, 43).

Energianvarastointitapoja on nykyisin useita erilaisia ja ne voidaan luokitella esimerkiksi varastointitavan, -kapasiteetin tai -ajan mukaan. Varastointitavan mukaan menetelmät luokitellaan lämpövarastoihin, sähkökemiallisiin varastoihin, kemiallisiin varastoihin ja mekaanisiin varastoihin (Demirel 2016, 321). Varastointitapa kertoo, missä muodossa

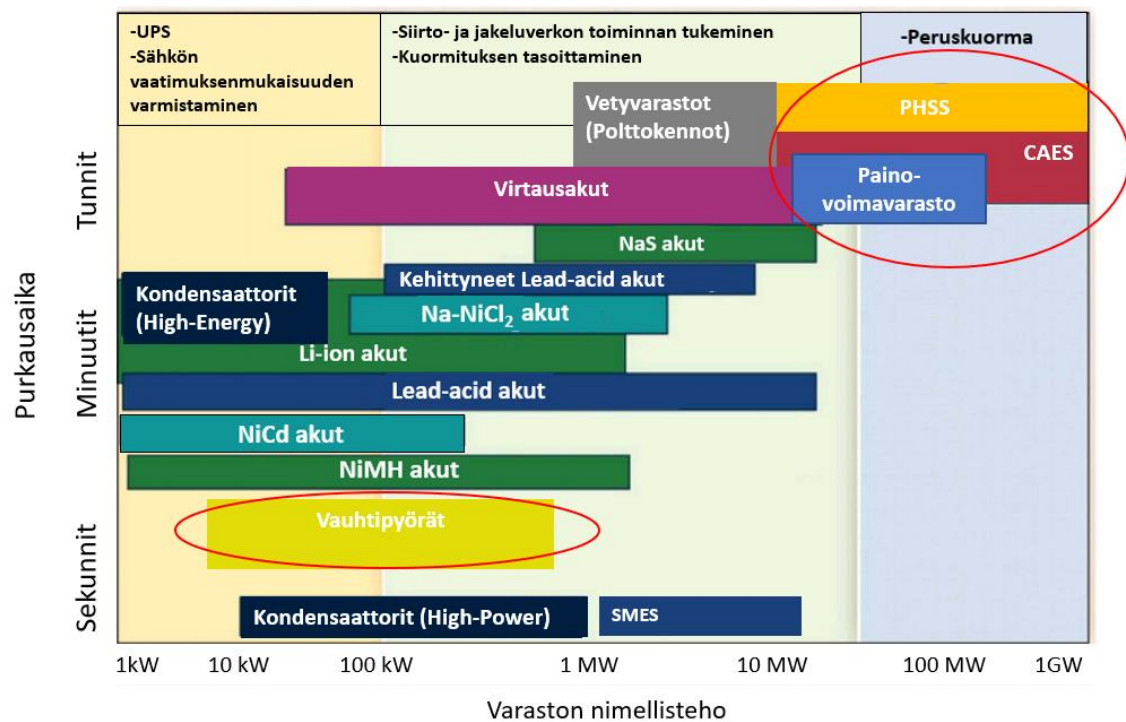
energia on varastoitu. Luokittelun perusteella voidaan huomata, että osa energiavarastoista pystyy muuttamaan sähkön väliaikaisesti toiseen muotoon ja palauttamaan sen tarvittaessa takaisin sähköksi. Joillakin teknologioilla sähkö voidaan muuttaa myös pysyvästi toiseen muotoon, esimerkiksi lämpövarastot muuttavat sähkön varastoiduksi lämmöksi ja kemiallinen power-to-gas varastointiteknologia pystyy tekemään sähkön avulla polttoainetta.

Kuvassa 1 on esitettyä yleisimpien energianvarastointimenetelmien asennetun nimellistehon (GW) määrä vuonna 2017. Kuvasta yksi nähdään, että pumpatut vesivarastot ovat suosituin energianvarastointimenetelmä. Pumpattujen vesivarastojen 169 gigawatin osuus on noin 96 % kaikesta asennetusta kapasiteetista maailmalla. Pumpatut vesivarastot kuuluvat mekaanisiin varastointimenetelmiin ja mekaanisten menetelmien yhteenlaskettu osuus oli 97 % kokonaiskapasiteetista. Tästä syystä on tärkeää selvittää mekaanisten energiavarastojen todellinen käytännöllisyys ja rooli osana uusia tulevaisuuden energiajärjestelmiä. (IRENA 2017, 30.)



Kuva 1. Energianvarastointimenetelmien prosenttiosuudet (IRENA 2017, 30).

Ennen mekaanisiin energiavarastointiteknologioihin perehtymistä on hyvä hahmottaa yleisesti erilaisten energiavarastojen suuruusluokkia. Kuvassa 2 on esiteltyä erilaisia sähkön varastointiin soveltuvia varastointimenetelmiä. Menetelmät on luokiteltu niiden tavanomaisten nimellistehojen ja keskimääräisten purkausajojen mukaan. Kuvaan on ympyröity punaisella mekaaniset energiavarastointimenetelmät, jonka avulla voidaan huomata, että suurin osa mekaanisista teknologioista on suuren kokoluokan energiavarastoja. Kuvassa on lisäksi avattu lyhyesti energiavarastojen käyttökohteita eri kokoluokissa. Selkeyden kannalta kuvassa 1 on esitettyä vain osa sähkönvarastointiin soveltuvista menetelmistä sekä niille kannattavia kokoluokkia ja purkausajoja. Tästä syystä purkausajat ja kokoluokat voivat vaihdella kuvassa ilmoitetuista arvoista.



Kuva 2. Sähkön varastointimenetelmien kokoluokat, purkausajat ja rooli sähköverkossa (mukaillen Guney et al. 2017, 1192; Aneke et al. 2016, 368).

Työn tarkoituksena on selvittää käytössä ja kehitteillä olevien mekaanisten energiavarastojen toimintaperiaatteet ja rooli energiasektorissa. Työssä avataan erilaisten

mekaanisten energiavarastojen toimintaperiaatteita ja olennaisia toiminta-arvoja. Työ toimii kirjallisuustutkimuksena, ja työssä esitetyt tulokset sekä johtopäätökset perustuvat tieteelliseen ja vertaisarvoituun kirjallisuuteen, kaupallisten valmistajien ilmoittamiin tietoihin, kansainvälisten organisaatioiden tekemiin tutkimuksiin ja muuhun kirjallisuusmateriaaliin. Työssä keskitytään enimmäkseen suuren kokoluokan energiavarastoihin ja niiden käyttötarkoituksiin. Jo olemassa olevista tutkimuksista poiketen kirjallisuustyön tarkoituksena oli keskittyä mekaanisiin energiavarastoihin ja niiden rooliin energiasektorilla. Vastaavanlaista suomenkielistä selvitystä ei ole aiemmin tehty, ja osa kansainvälisistä lähteistä on vanhentuneita tai pintapuolisia. Osa teknologioista on vasta konseptitasolla, minkä vuoksi tutkimustuloksia on arvioitu useiden lähteiden pohjalta, ja niistä on pyritty rakentamaan mahdollisimman realistinen kokonaiskuva.

Työ koostuu viidestä osa-alueesta. Aluksi käsitellään pumpattuja vesivarastoja ja muita painovoimaa hyödyntäviä teknologioita. Kolmannessa osiossa käsitellään vauhtipyörien toimintaperiaatteita. Neljännessä osiossa perehdytään paineilmavarastoihin, jonka jälkeen selvennetään mekaanisten energiavarastojen osuutta energiantuotannossa, varastoidun sähkön myyntihintaa ja niiden energiaturvallisuutta. Viimeisessä osiossa esitetään lyhyt kertaus työn sisällöstä ja aiheeseen liittyviä johtopäätöksiä.

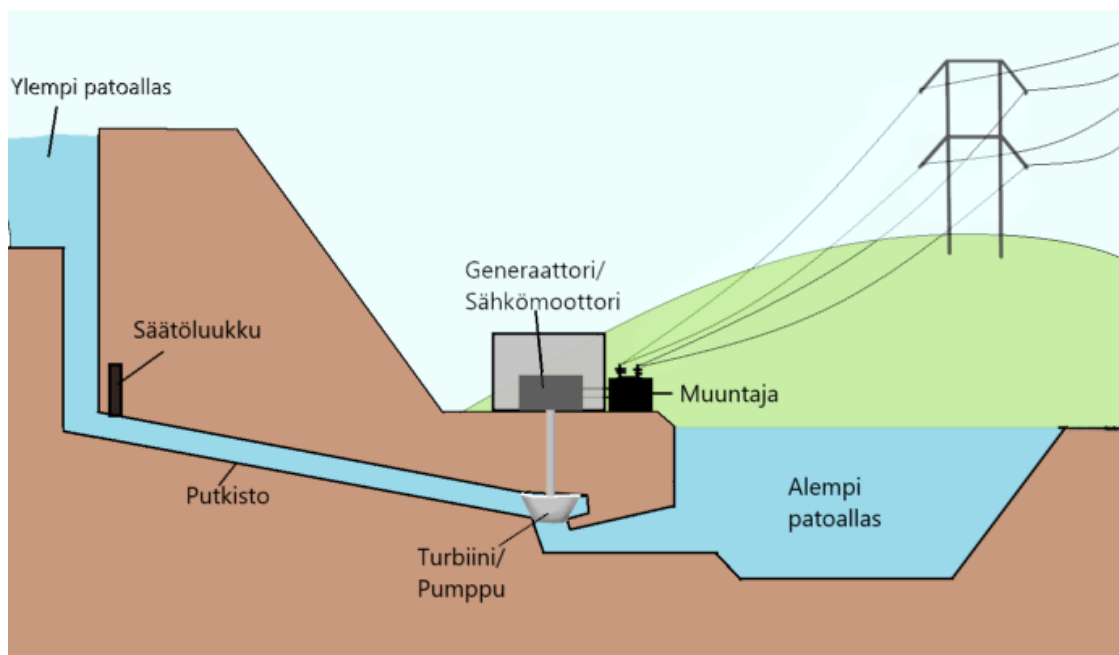
2 PUMPATUT VESIVARASTOT

Komarnicki et al. (2017, 134) mukaan pumpatut vesivarastot olivat vuonna 2017 maailmanlaajuisesti kehittynein ja käytetyin suuren mittakaavan energian varastointiteknologia. Väitettä tukee aiemmin esitelty International Renewable Energy Agencyn tekemä selvitys (IRENA 2017, 28-29), jonka mukaan kyseisenä vuonna toiminnassa olevaa vesivarastokapasiteettia oli käytössä noin 169 GW. Eniten asennettua kapasiteettia vuoden 2017 puolella välissä oli Kiinasta 32,0 GW, Japanista 28,3 GW ja Yhdysvalloista 22,6 GW (IRENA 2017, 30). International Energy Agency arvioi vuoden 2017 vesivarastojen kapasiteetiksi 172 GW, ja ennustaa kapasiteetin kasvavan 180 GW vuoteen 2020 mennessä (IEA 2019b).

PHSS eli pumpattu vesivarasto tulee sanoista Pumped Hydroelectric Storage System. PHSS on energianvarastointimenetelmä, joka perustuu energian muuntamiseen väliaikaisesti potentiaalienergiaksi pumpaamalla vettä. Myöhemmin voimalaitokset juoksuttavat veden turbiinin läpi, jolloin veden potentiaalienergia muuttuu ensin kineettiseksi energiaksi, sitten turbiinin roottorissa vääntömomentin myötä pyörimisenergiaksi ja lopulta generaattorissa takaisin sähköksi. Pumpatut vesivarastot toimivat yleensä osana vesivoimalaitosta. (Huggins 2010, 60-62.)

Varastointijärjestelmä koostuu vähintään kahdesta patoaltaasta, putkistosta, turbiinista, pumpusta, generaattorista, sähkömoottorista, muuntajasta sekä yhteydestä sähköverkkoon (Komarnicki et al. 2017, 134). Pumpatun vesivaraston rakenne ja laitteisto on esitetty kuvassa 3. Patoaltaat voivat olla luonnollisia vesialtaita, kuten järviä tai keinotekoisia patoaltaita. Veden varastointiaika altaissa vaihtelee voimalaitoksesta riippuen tunneista kuukausiin (Zakeri & Syri 2014, 592). Nykyisin pumppuvoimalaitoksissa käytetään pääsääntöisesti reverssiibeilitä eli suunnanvaihdolla varustettuja turbiineita. Käytössä on myös sähkömoottori, joka toimii samalla prosessin generaattorina. Pumpattu vesivarasto voidaan kuitenkin rakentaa joko kaksi- tai kolmiyksikköiseksi. Kaksiyksikköinen ratkaisu koostuu pumpputurbiinista ja sähkömoottorista, eli pumppu ja turbiini ovat yhdistettynä. Kolmiyksikköisessä

ratkaisussa pumppu ja turbiini ovat erillisiä, mikä mahdollistaa korkeamman hyötysuhteen, mutta on kalliimpi rakentaa, kuin kaksiyksikköinen ratkaisu. Kaksiyksikköisessä ratkaisussa säästetään noin 20 % laitteiston investointikustannuksista. Lähtökohtaisesti molemmilla ratkaisuilla päästään korkeisiin hyötysuhteisiin ja taajuusmuuttajan käytöllä voidaan laajentaa turbiinin käyttöaluetta sekä nostaa pumpun pyörimisnopeutta. Lisäksi taajuusmuuttajan avulla on mahdollista aloittaa pumppaus ilman jännitehäiriöitä. (Komarnicki et al. 2017, 134-136.)



Kuva 3. Pumpatun vesivaraston rakenne (mukaillen Wagner et al. 2011, 7).

Pumpatuissa vesivarastoissa käytetään yleensä Francis- tai Pelton-mallisia turbiineja. Turbiinin valintaan vaikuttaa erityisesti veden putouskorkeus ja veden tilavuusvirran suuruus prosessin aikana. Francis-turbiinien käyttöalueeksi mainitaan 15-500 metrin putouskorkeudet (Wagner et al. 2011, 8). Komarnicki ja muiden (2017, 135) mukaan suunniteltu käyttöalue vastaavanlaisille turbiineille on 700-800 metriin asti. Pelton-turbiineita käytetään vastaavasti korkeammille, jopa 1800 metrin putouskorkeuksille (Zhang 2016, 286). Francis-turbiineiden etuna on mahdollisuus toimia suurilla tilavuusvirroilla, kun taas Pelton-turbiinien käyttöalue rajoittuu pienille

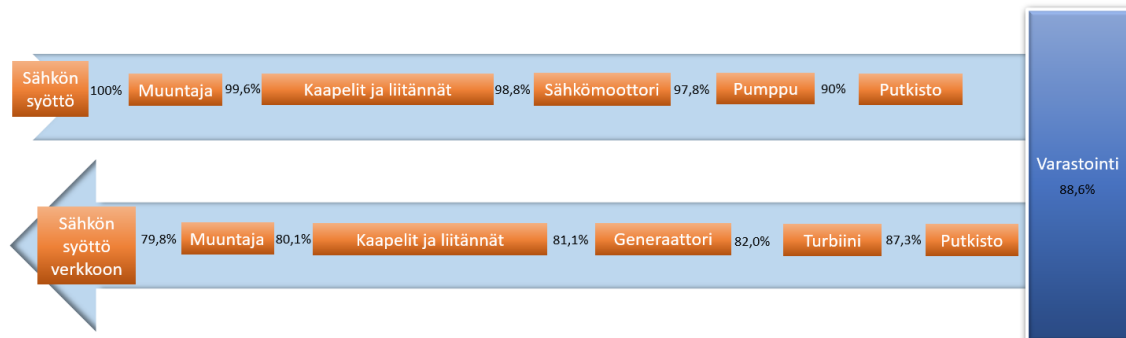
tilavuusvirtauksille. Molemmille turbiineille on ominaista niiden nopea käynnistysvaste, joka vaihtelee 1-3 minuutin välillä. (Wagner et al. 2011, 8-11.)

Turbiineja on mahdollista olla useampia, ja tyypillisimmät turbiinien kokoluokat ovat 300-400 MW (Rehman et al. 2015, 596). Pumpputurbiini pyritään sijoittamaan yleensä ala-altaan alapuolella tai maan alle, jotta vältetään alhaisen paineen aiheuttamalta kavitoinnilta (Alanen et al. 2003, 45). Kavitaatiota syntyy, kun imupuolen staattisen paineen alenemisen myötä neste alkaa höyrystyä. Höyrykuplat kulkeutuvat nesteen mukana, kunnes paine kasvaa ja höyrykuplat tiivistyvät takaisin nesteeksi. Höyryn tiivistyminen aiheuttaa nopeita paineen muutoksia, jonka seurauksena syntyy materiaalivaurioita. (Franc & Michel 2005, 6-7.)

Pumpattujen voimalaitosten nimellistehot vaihtelevat 10-5000 MW välillä. Varaston purkaus aika on sekunneista vuorokauteen, yleensä tunteja. Varaston energiatiheys on 0,5-1,5 Wh/kg. Pumpattujen vesivarastojen toimintaikä on noin 50-60 vuotta ja mahdollisia latauskertoja käyttöikänsä aikana on noin 20 000-50 000 kappaletta. (Zakeri & Syri 2014, 590-593) Pumppuvoimalaitosten kokonaishyötysuhteet vaihtelevat 70-85 %:n välillä riippuen siitä, kuinka uutta teknologia on (Rehman et al. 2015).

Kokonaishyötysuhteella tarkoitetaan round trip -hyötysuhdetta, joka kertoo kuinka paljon energiaa, saadaan ulos suhteessa varastointiprosessiin syötettyyn energiaan. Hyötysuhteessa on otettu huomioon kaikki prosessin aikana tapahtuvat häviöt. Häviöitä prosessissa aiheuttaa esimerkiksi veden väheneminen patoaltaasta haihtumisen tai vuotojen seurauksena, vuodot turbiinin ympärillä ja virtaavan veden kitkan aiheuttamat häviöt. Pumpussa ja turbiinissa häviöitä aiheuttavat kitka ja turbulenssi. Sähköhäviöitä syntyy sähkömoottorin ja generaattorin toiminnasta. Pumpatun vesivaraston kokonaishyötysuhde voidaan eritellä prosessin joka vaiheessa alla esitetyn kuvan mukaan. Kuva neljä esittää tilannetta, jossa pumppu ja generaattori toimivat erillisinä yksikköinä. Kuvasta voidaan todeta, että suurimmat häviöt prosessissa aiheutuvat pumpussa ja turbiinissa. Huomataan myös, että pumpattujen vesivoimavarastojen

merkittävä etu on mitättömät varastoinnin aikaiset häviöt. (Komarnicki et al. 2017, 134; Wagner et al. 2011, 8-11.)



Kuva 4. Esimerkkitalanne PHSS-prosessin häviöiden jakautumisesta (mukaan Wagner et al. 2011, 11).

Hyvänä esimerkkinä perinteisestä pumpatun veden varastosta toimii Vattenfallin omistama ja vuonna 1968 käyttöön otettu Wendefurthin vesivarasto Saksassa. Laitoksen nimellisteho on 80 megawattia. Varastoidun sähkön määrä riippuu kysynnästä, mutta keskimääräinen sähköntuotanto on ollut 91 GWh vuodessa. Ylemmän patoaltaan varastointitilavuus on 1,8 miljoonaa m³. Laitos saavuttaa täyden tehonsa parissa minuutissa ja sen mahdollinen purkaus aika on noin 6,5 tuntia. Varaston putouskorkeus on 126 metriä. Vesivarasto sisältää kaksi Francis turbiinia ja veden tilavuusvirta turbiineiden läpi on 39 m³/s. (Vattenfall 2019a; Vattenfall 2012.) Uudemman sukupolven vesivarastoista hyvänä esimerkkinä toimii vuonna 2014 käyttöön otettu Goldisthalin varasto Saksassa. Se on yksi Euroopan suurimmista energiavarastoista 1060 MW nimellisteholla ja 302 metrin putouskorkeudella (Vattenfall 2019b).

Perinteisten pumppuvoimalaitosten lisäksi on olemassa onkalolaitoksia, joissa ala-allas sijaitsee syvällä maan sisällä, kuten kaivoksessa. Onkalolaitoksen etuna on suuri putouskorkeus, joka parantaa varaston kykyä varastoida ja generoida sähköä. Mitä suurempi korkeusero on turbiiniin nähden, sitä enemmän vesivarastolla on potentiaaliero, joka muuttuu liike-energiaksi ja saadaan muutettua sähköksi turbiinin

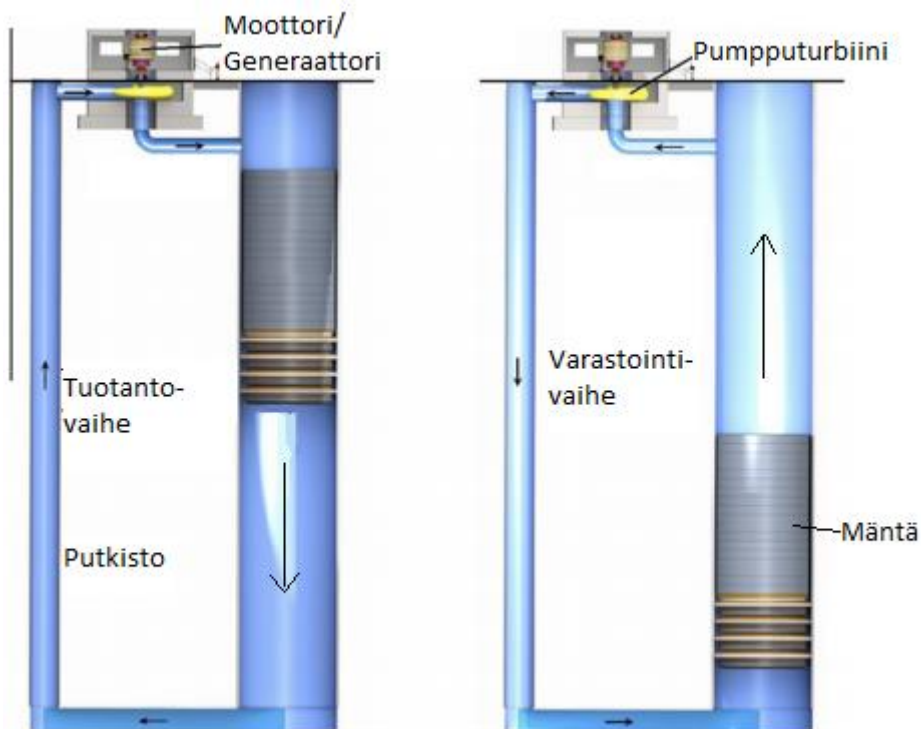
avulla. (Alanen et al. 2003, 44-45.) Pumpattuja vesivarastoja on myös mahdollista käyttää suolaisella merivedellä. Japanissa on käytössä tällä hetkellä maailman ainoa merivedellä toimiva pumpattava vesivarasto. Pumppuvoimalaitos sijaitsee Japanin pohjoisrannikolla ja sen putoukorkuus on 136 metriä ja teho 30 megawattia. Veden varastointikapasiteetti on 564 000 m³. Irlantiin suunnitellaan suurempaa 480 MW merivesivarastoa. Sen tarkoituksena olisi varastoida Irlannin energiasuunnitelman mukaan noin kolmasosa tuulivoiman tuottamasta ylijäämäenergiasta. (Rehman et al. 2015, 594-595.)

Pumpattavien vesivarastoiden käyttö on erityisen hyödyllistä, kun sähkön hinnan vaihtelua vuorokausien ja jopa tuntien aikana on suurta. Pumpattavien vesivarastojen tarkoituksena on, että voimalaitokset voivat varastoida energiaa patoaltaisiin, kun sähkön myynti ei ole kannattavaa, tai syntyy ylimääräsähköä esimerkiksi tuulivoimasta, joka menisi muuten hukkaan. Tämä parantaa vesivoimalaitosten tehokkuutta ja kannattavuutta. (Yucekaya 2015, 43-45.) Pumppuvoimalaitoksia käytetään erityisesti huippukuormituksen tasoittamiseen, mutta lisäksi ne soveltuvat hyvin energian pitkäaikaiseen varastointiin ja pyöriväksi reserviksi. Pumppuvoimalaitoksia käytetään myös verkon taajuuden säätämiseen, ja loistehon kompensointiin. (Alanen et al. 2003, 44-45.)

Pumpattavien vesivarastojen ominaiskustannushinnat muodostuvat useista erilaisista kiinteistä ja muuttuvista kustannuksista. Pumpattaville vesivarastoille on ominaista alhaiset energian varastointikustannukset, mutta korkeat kokonaiskustannukset. Energiavarastojen kustannukset koostuvat teknologian ja laitteiden kustannuksista sekä yleiskustannuksista. Yleiskustannuksiin kuuluvat esimerkiksi suunnittelun, kuljetuksien, työn valvonnan ja lainsäädännön aiheuttamat kustannukset. Arviolta vesivarastojen kokonaiskustannukset perustuen nimellistehoon vaihtelevat 1030-1675 €/kW välillä. Ominaiskustannushinta näin ollen vaihtelee 96-181 €/kWh välillä. Arviot on tehty perustuen tavanomaiseen varastokokoon ja noin kahdeksan tunnin varastointiaikaan. Kustannusten tarkempaa analyysia on tarkasteltu esimerkiksi Zakerin ja Syrin tekemässä tutkimuksessa. (Zakeri & Syri 2014, 590-593.)

2.1 Painovoimateknologiat

Pumpattujen vesivarastojen käyttö on maantieteellisesti hyvin rajoittunutta, minkä takia on kehitetty muita potentiaalieroihin perustuvia varastoja. Yksi esimerkki on nestemännällä toimiva painovoimavarasto. Kyseinen energiavarasto on suljettu systeemi, joka koostuu maanalaiseen onkaloon sijoitetusta männästä, pumpputurbiinista, moottorigeneraattorista ja putkistosta. Energiaa varastoidessa vettä pumpataan männän alle, jolloin se nousee. Vastaavasti potentiaalienergia saadaan muutettua sähköksi vapauttamalla mäntä. Puristuksen seurauksena vesi virtaa turbiinin läpi ja saadaan generoitua sähköksi. Varaston toimintaperiaate sekä pääkomponentit on esitetty kuvassa 5. (Aneke et al. 2016, 357.)



Kuva 5. Painovoimavaraston rakenne (mukaillen Aneke et al. 2016, 357)

Varaston etuina on, että painovoimavarasto ei ole maantieteellisesti riippuvainen ja sen käyttö vaatii vähemmän vettä verrattuna pumpattuihin vesivarastoihin. Kyseisen

painovoimavaraston käyttöä on arvioitu 30-60 vuotta ja round trip -hyötysuhteeksi noin 80 %. Nimellisteho vaihtelee 40-150 megawattiin ja varastojen energiatiheys on arviolta 1,06 Wh/kg. Suunniteltu energianvarastointikapasiteetti on 1-8 GWh riippuen varaston suuruusluokasta. Varastointiaika on tunneista kuukausiin ja investointikustannukset ovat noin 900 €/kW ylöspäin. Kaupallisesti suunnittelevan yrityksen toimesta ominaiskustannushinnaksi on arvioitu 140-340 €/kWh yleisimmille varastointikokoluokille (Gravity Storage 2019a). Painovoimavarastot ovat vasta suunnitteluvaiheessa, joten niiden rooli energian varastoinnissa on vielä alhainen. Painovoimavarastot muistuttavat toiminta-arvoiltaan merkittävästi pumpattuja vesivarastoja ja niitä on suunniteltu jo osaksi Saksan sähkövoimajärjestelmää. (Aneke et al. 2016, 368; Gravity Storage 2019b.)

Muita suunnitteilla olevia projekteja on muun muassa The Dead Sea Power Project, jonka tarkoituksena on rakennuttaa 72 kilometriä pitkä putkisto Punaiselta mereltä Quamranin edustalle. Vettä juoksettaisiin putkistoa pitkin turbiinin läpi 8 m/s vauhdilla, jolloin pystyttäisiin tuottamaan sähköä 1500-2500 MW teholla ja täyttämään kuollut meri seuraavan seitsemän vuoden aikana. Toisena mahdollisena teknologiana on saksalaisen Rainer Schrammin kehittämä teknologia, jonka avulla energiaa varastoitaisiin meren pohjaan. Teknologia perustuu meren pohjan ja pinnan välisiin paine-eroihin. Energiavarasto koostuu meren pohjaan sijoitetusta pumpputurbiinista, venttiilistä sekä vesisäiliöstä. Säiliöt ovat yhteydessä meren pinnalle. Venttiilin avautuessa vesi pyrkii virtaamaan turbiinin läpi ja täyttämään säiliöt. Kun säiliöt ovat täynnä, voidaan ylijäämäenergia käyttää veden pumppaamiseen pois säiliöistä pumpputurbiinin avulla ja aloittaa prosessi alusta. Prosessin hyötysuhteen on arvioitu olevan samaa suuruusluokkaan kuin muiden painovoimavarastojen. (Rehman et al. 2015, 594-596.)

3 VAUHTIPYÖRÄT

Vauhtipyörät eli englanniksi flywheels ovat energiavarastointimenetelmä, jossa sähköä varastoidaan kasvattamalla vauhtipyörän pyörimisnopeutta sähkömoottorin avulla. Myöhemmin vauhtipyörän liike-energia tai osa siitä voidaan muuttaa takaisin sähköksi generaattorilla. Varastoinnin aikana vauhtipyörä pyörii tasaisesti sen joutokäyntinopeudella. Vauhtipyörän mahdolliseen energianvarastointikykyyn vaikuttavat pyörivän massan ominaisuudet eli vauhtipyörän koko, vauhtipyörän muoto, käytetty materiaali sekä pyörimisnopeus. Pyörimisnopeus vaikuttaa merkittävästi varastoidun energian määrään, sillä pyörivään kappaleeseen sitoutuneen liike-energian määrä riippuu pyörimisnopeuden neliöstä. (Komarnicki et al. 2017, 136-140; Saidi et al. 2018, 676-680.) Vauhtipyörät voidaan luokitella kahteen ryhmään pyörimisnopeuksien mukaan: matalan ja korkean pyörimisnopeuden vauhtipyörät. Matalan pyörimisnopeuden vauhtipyörillä nopeus on korkeintaan 6 000-10 000 rpm ja korkean pyörimisnopeuden vauhtipyörillä nopeus voi olla jopa 100 000 rpm (Energy Storage Association 2019; Komarnicki et al. 2017, 138.). Vauhtipyörien pyörimisnopeuksien ylärajat ovat kuitenkin ristiriitaista, ja esimerkiksi Sara Saidin ja Djebli Abdelouahedin (2018,677) raportissa mainitaan vauhtipyörien pystyvän saavuttamaan vain 50 000 rpm pyörimisnopeus.

FES (Flywheel Energy Storage) energiavarasto koostuu sylinterimäisestä vanteesta eli vauhtipyörästä, laakereista, akselistä, suunnanvaihdolla varustetusta moottorigeneraattorista ja tyhjiökammioista. Yleensä vauhtipyörä on eristettynä matalapainetyhjiöön, joka vähentää ilman ja vauhtipyörän välistä kitkaa. Laakereina voidaan käyttää esimerkiksi mekaanisia, magneettisia tai suprajohtavia magneettisia laakereita. Magneettiset laakerit ovat kalliimpia verrattuna mekaanisiin laakereihin, mutta niiden avulla kitkaa saadaan vähennettyä entisestään erityisesti suurilla pyörimisnopeuksilla toimivissa energiavarastoissa. Vanteen eli vauhtipyörän materiaali vaikuttaa energiavaraston hintaan, sen fyysisiin ominaisuuksiin ja suorituskykyyn. Matalan pyörimisnopeuden vauhtipyörien materiaalina käytetään terästä, ja laakereina käytetään mekaanisia laakereita. Korkeiden nopeuksien vauhtipyörien rakentamisessa käytetään komposiittimateriaaleja, kuten hiilikuitua. Komposiittimateriaalit ovat kestäviä

ja kevyitä, sekä ne mahdollistavat suuremmat pyörimisnopeudet verrattuna teräkseen. Energiavaraston kokoonpanoon kuuluu lisäksi vauhtipyörän vaatima suojausrakennus, tehonohjausyksikkö ja jäähdytysjärjestelmä. Kuvassa 6. on esiteltyä vauhtipyörän ja energiavaraston rakenne. (Energy storage association 2019; Komarnicki et al. 2017, 136-140.)



Kuva 6. Vauhtipyörän rakenne ja asennuskokoonpano (mukaiillen Beacon Power 2018a; Beacon Power 2018b)

Vauhtipyörät ovat parhaimmillaan sovelluksissa, jotka vaativat korkeaa tehoa, mutta matalaa energiankulutusta. Yksittäisten vauhtipyörien nimellisteho vaihtelee yleensä muutamista kilowateista aina 250 kilowattiin (Zakeri & Syri 2014, 592). Beacon Power valmistaa esimerkiksi 160 kW vauhtipyöriä, joista voidaan muodostaa jopa kymmenien megawattien varastointikokonaisuuksia (Beacon Power 2018a; Beacon Power 2018d) Yksittäisen vauhtipyörän mahdollinen energianvarastointikyky vaihtelee 0,25-6 kWh välillä (Komarnicki et al. 2017, 137-140). Yksittäisen vauhtipyörän ominaisteho on jopa 1000 W/kg ja energiatiheys vaihtelee 5-100 Wh/kg. Vauhtipyörät soveltuvat osaksi laitteita, joissa tarvitaan esimerkiksi useita perättäisiä latausjaksoja. Purkausaika vaihtelee yleensä muutamista millisekunneista aina 15 minuuttiin asti. Etuina vauhtipyörissä on vähäinen huoltotarve, nopea latausaika ja pitkäikäisyys. Odotettu käyttöikä on 15-20 vuotta ja latauskertoja ne kestävätkin on noin 20 000-100 000 kappaletta. (Zakeri & Syri 2014, 592) Uusimman teknologian vauhtipyörät voivat kestää jopa

175 000 latauskertaa. Latauskapasiteetti ei vauhtipyörillä heikkene, toisin kuin esimerkiksi kemiallisissa akuissa ja paristoissa (IRENA 2017, 58-61). Etuna on myös se, että vauhtipyörän pyörimisnopeuden muuttuminen sitä ladatessa tai purkaessa mahdollistaa sen, että energiavaraston lataustila pystytään määrittämään tarkasti sen pyörimisnopeuden avulla (IRENA 2017, 58-61). Prosessin round trip -hyötysuhde on yleensä yli 80 %. (Komarnicki et al. 2017, 137-140). Lyhyillä varastointiajoilla sekä uudella teknologialla voidaan päästä kuitenkin jopa 95 %:n hyötysuhteisiin (Zakeri & Syri 2014, 590-593).

Vauhtipyörien käyttö on kuitenkin hyvin vähäistä verrattuna muihin energianvarastointimuotoihin. Vauhtipyörien käytössä olevaa kapasiteettia oli vuonna 2017 International Renewable Energy Agency:n tekemän selvityksen mukaan 0,9 GW, mikä vastasi vain noin 0,5 % kokonaisenergianvarastointikapasiteetista kyseisenä vuonna (IRENA 2017, 29-31). Vauhtipyöriä käytetään pääsääntöisesti lyhyen ajan energianvarastointiin ja varastointiajat vaihtelevat muutamista sekunneista tunteihin. (Energy Storage Association 2019). Vauhtipyöriä on tutkittu laajasti etenkin osana teollisia sovelluksia ja moottoreita (Energy Storage Association 2019; IRENA 2017, 58-61). Yksittäisiä 2kW-6kW vauhtipyöriä käytetään muun muassa tietoliikennesovelluksissa. Tällä hetkellä vauhtipyöriä käytetään myös useissa avaruusteknologian sovelluksissa sekä laitteissa, joissa halutaan taata katkeamaton energiansaanti. (Energy Storage Association 2019.) Suuren kokoluokan vauhtipyöraenergiavarastosta hyvänä esimerkkinä toimii vuonna 2011 Beacon Powerin valmistama 20 MW energiavarasto New Yorkissa Yhdysvalloissa. Energiavarasto koostuu 200 vauhtipyörästä ja kokonaislataus-purkausjaksoja tapahtuu 3000-5000 kappaletta vuodessa. Energiavarasto kattaa 30 % paikallisesta taajuuden säädöstä. (Beacon Power 2018c). Varasto varastoi noin 5 MWh sähköä vuosittain (Komarnicki et al. 2017, 137-140). Vastaavanlainen energiavarasto rakennettiin vuonna 2014 Pennsylvaniaan Yhdysvaltoihin.

Korkeiden pyörimisnopeuksien vuoksi vauhtipyörät voivat aiheuttaa vakavia vahinkoja rikkoutuessaan, joten energiavaraston heikkoutena ovat riskien minimoimiseksi tehtävät

turvatoimenpiteet. Yleensä vauhtipyörät sijoitetaan maan alle, jolloin esimerkiksi mahdollinen vauhtipyörän tai laakerin hajoaminen eivät aiheuta vahinkoa ympäristölle. Varastojen heikkoutena voidaan pitää myös korkeaa itsepurkautumisnopeutta (~3 %/h). (Komarnicki et al. 2017, 137-140; Zakeri & Syri 2014, 592). Tämä tarkoittaa sitä, että jo vuorokauden aikana varastointihäviöt nousevat niin korkeiksi, että sähkön varastointi ei ole kannattavaa. Vauhtipyörät vaativat lisäksi säännöllistä huoltoa toimiakseen ja ne magneettisia laakereita käytettäessä ne ovat riippuvaisia ulkoisesta energialähteestä. (IRENA 2019, 61.)

Kokonaiskustannukset korkean pyörimisnopeuden vauhtipyörillä nimellistehon mukaan vaihtelevat 590-1446 €/kW. Yleensä kustannukset asettuvat 800-900 €/kW väliin. Ominaiskustannushinnat vaihtelevat 1850-25049 €/kWh välillä. Tähän vaikuttaa merkittävästi vauhtipyörien käyttöaika. Kustannukset on laskettu tyypillisimmällä varastointikoolla, eikä hinnoissa ole huomioitu sähkön siirron ja sähköverkon infrastruktuurin aiheuttamia kustannuksia. (Zakeri & Syri 2014, 590-593.) International Renewable Energy Agency arvioi vuonna 2016 kokonaiskustannuksiksi 1320-5280 €/kWh. Arvion mukaan ominaiskustannukset laskevat 880–3430 €/kWh välille vuoteen 2030 mennessä (IRENA 2016, 62). Kustannusten vaihteluväli on todella suuri, mikä voi johtua esimerkiksi käytettyjen laakereiden tyypistä ja vauhtipyörän materiaalikulujen vaihteluista. Vauhtipyörät pystyvät siirtämään jopa 5000 MWh käyttöään aikana, mikä tekee niistä edullisen varastointimenetelmän käyttöikänsä ja energiamääräänsä nähden (Beacon Power 2018d).

4 PAINEILMAVARASTOT

Paineilmavarastolla (Compressed Air Energy Storage) tarkoitetaan energian varastointimenetelmää, jossa kompressoreilla puristetaan ilmaa korkeaan jopa yli 70 bar paineeseen joko maanalaisiin luolastoihin tai maanpäällisiin suuriin säiliöihin (Komarnicki et al. 2017, 153-154; Sumper et al. 2016, 96). Sähkön kysynnän kasvaessa paineistettu ilma muutetaan takaisin sähköksi kaasuturbiinin ja generaattorin avulla. Paineilmavarastoja pidetään yhtenä lupaavimpana varastointimenetelmänä ja kilpailukykyisenä teknologiana pitkän aikavälin energian varastoinnissa. Teknologia on kuitenkin pitkälti kehitysvaiheessa, ja asennettua kapasiteettia oli vuonna 2017 International Renewable Energy Agencyn tekemän kartoituksen mukaan vain noin 0,6 GW. Tällä hetkellä on vain kaksi toiminnassa olevaa suuren mittaluokan paineilmavarastoa: Huntorfin laitos Saksassa ja McIntoshin laitos Alabamassa, Yhdysvalloissa. (IRENA 2017, 31.)

Paineilmavarastoteknologioita on olemassa useita erilaisia ja ne voidaan luokitella esimerkiksi turbiinille menevän ilman lämmityslähteen mukaan. Polttoaineella toimivien paineilmavarastojen lämmityksen lähteenä käytetään fossiilisilla polttoaineilla toimivaa polttokammiota. Uudemmissa versioissa turbiinilta ulostulevaa hukkalämpöä käytetään rekuperaattorin avulla korvaamaan osa polttoainelämmityksestä. AA-CAES konseptissa hyödynnetään adiabaattista prosessia, jossa ilman lämmitys tapahtuu pelkästään turbiinilta ulos tulevan hukkalämmön ja ilman puristamisessa syntyvän lämmön avulla. (Zhou et al. 2018, 163.)

Kaikkien varastointiteknologioiden tarkoituksena turvata energiansaantia ja tasata sähkön tuotannon ja kysynnän välisiä eroja vuorokauden aikana (Zhou et al. 2018, 163). Paineilmavarastoja käytetään suurimmaksi osaksi paikallisena energialähteenä, käynnistysapuna verkon tai voimalaitoksen kaatuessa, kapasiteettireservinä, kysynnän tasoittamisessa ja taajuudensäädössä (IRENA 2017, 13). Kaikissa paineilmavarastoissa voidaan käyttää myös maanpäällisiä tai maanalaisia luolastoja varastointisäiliöinä. Sopivaksi luolastoksi kelpaavat esimerkiksi suolakiviluolastot (Crotogino et al. 2001, 3).

Sopivien luolastojen löytäminen on kuitenkin rajoittanut paineilmavarastojen rakentamista ja ovat yksi syy paineilmavarastojen suuriin investointikustannuksiin (Sumper et al. 2016, 96-97). Osioissa 4.1-4.4 avataan enemmän erilaisten paineilmavarastojen toimintaperiaatteita. Tutkimuksessa on keskitytty pääasiassa suuren kokoluokan paineilmavarastoihin, joissa käytetään maanalaisia luolastoja paineilmasäiliöinä.

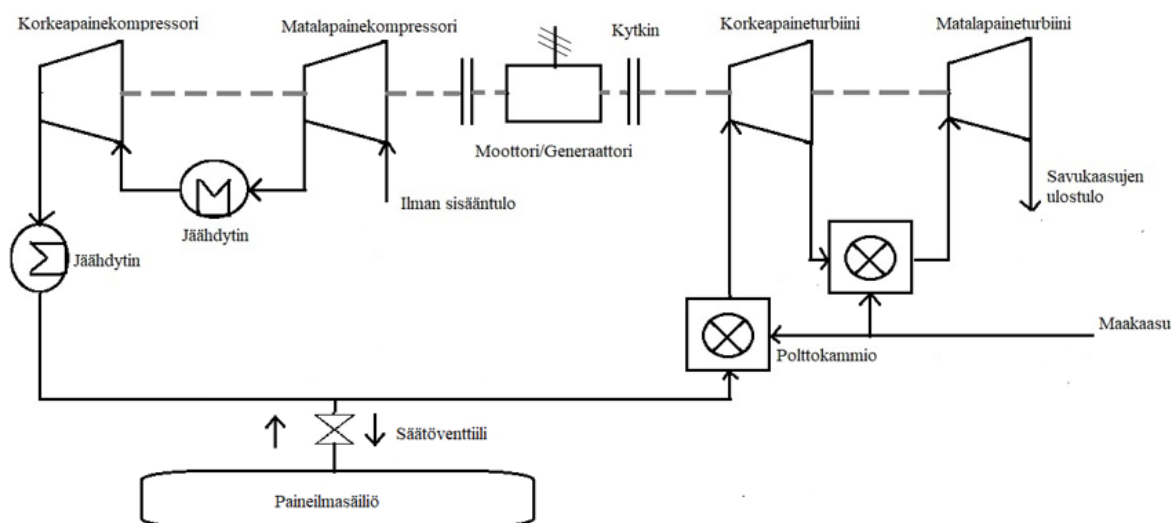
4.1 Polttoaineella toimivat paineilmavarastot

Perinteinen paineilmavarasto eli D-CAES koostuu moottorista, generaattorista, useista kompressoreista, jäähdyttimistä, ilmasäiliöstä, polttokammioista sekä ainakin kahdesta turbiinista. Aluksi ilma puristetaan haluttuun loppupaineeseen useiden kompressorien avulla, jolloin sähköenergia saadaan muutettua mekaaniseen muotoon. Ilmaa jäähdytetään jokaisen kompressorin jälkeen jälkijäähdyttimillä, sillä ilman puristaminen aiheuttaa lämpötilan nousun kompressoreissa. Välijäähdytykset vähentävät seuraavan kompressorin vaatimaa tehoa ja mahdollistavat paineilman tehokkaamman varastoimisen. Ilman jäähdyttäminen parantaa varastointikapasiteettia, sillä kylmän ilman vaatima varastointitilavuus on pienempi, kuin vastaavan määrän kuumaa ilmaa. (Budt et al. 2016, 257-259; Zhou et al. 2018, 163-164.)

Ilman paineistamisen ja jäähdyttämisen jälkeen se varastoidaan varastointisäiliöön, jossa varastointilämpötila pyritään saamaan lähellä ympäristön lämpötilaa (Sumper et al. 2016, 96). Säiliöstä ilmaa johdetaan sähkön tarpeen mukaan kaasuturbiineille. Ennen turbiineille siirtymistä ilmaa esilämmitetään polttamalla fossiilisia polttoaineita polttokammiossa, mikä kasvattaa ilman sisäenergiaa. Tämän jälkeen kuuma savukaasu paisuu korkeapaineturbiinissa. Korkeapaineturbiinin jälkeen kaasuseos lämmitetään uudelleen ja johdetaan matalapaineturbiinille, jossa tapahtuu toinen paisunta. Lopulta turbiineiden kineettinen energia muutetaan sähköksi generaattorin avulla. (Budt et al. 2016, 257-259.)

Hyvänä esimerkkinä maakaasulla toimivasta paineilmavarastosta on Saksaan vuonna 1978 käyttöön otettu Huntorfin paineilmavarasto, joka oli ensimmäinen käyttöön otettu

paineilmavarasto maailmassa. Huntorfin paineilmavarasto pystyy varastoimaan energiaa 60 megawatin edestä alle 12 tunnissa ja vastaavasti syöttämään sitä sähköverkkoon 290 megawatin edestä kolmen tunnin käyttöajalla (Crotagino et al. 2001, 2). Prosessin hyötysuhde on noin 42 % (Budt et al. 2016, 261). Huntorfin laitos sisältää kaksi paineilmavarastoa, joiden kokonaistilavuus 310 000 m³. Ilmavirta kompressorilta on 108 kg/s ja turbiinin läpi kulkeva ilmavirta 417 kg/s. Varastointilämpötila vaihtelee 10-40°C ja varastointipaine on 43-70 baaria. (Crotagino et al. 2001, 1-4.) Prosessin aikana lämpötilat ja paineet vaihtelevat suuresti, esimerkiksi korkeapaineturbiinin sisääntulolämpötila on 490°C ja sisääntulopaine on noin 41,3 bar. Matalapaineturbiinille ilma tulee sen sijaan 945°C asteisena ja 12,8 baarin paineessa. Varaston käynnistysaika suhteellisen pitkä, jopa 14 minuuttia. (Budt et al. 2016, 261.) Kuvassa 7 on esitettyä Huntorfin kaltaisen paineilmavaraston rakenne, jossa polttoainelähteenä toimii maakaasu.

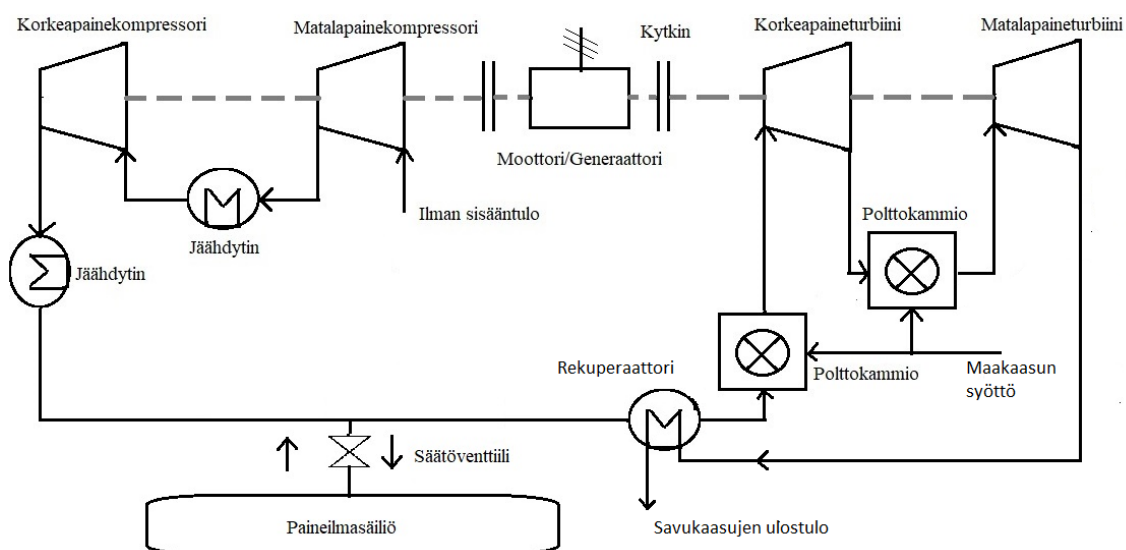


Kuva 7. Yksinkertaistettu prosessikuva Huntorfin kaltaisesta paineilmavarastosta (mukaillen Budt et al. 2016, 259)

Huntorfin paineilmavarastossa ei hyödynnetä ilman puristuksessa syntyvää lämpöä tai matalapaineturbiinilta tulevaa hukkalämpöä. Huntorfin laitoksen kaltaiselle vanhalle teknologialle on tästä syystä ominaista suuret ulostuloilman lämpötilat. Huntorfin

laitoksen kaasujen ulostulolämpötila on 480°C (ebid). Tästä syystä prosessista saatava teho ja hyötysuhde jäävät alhaisiksi.

Myöhemmin teknologian kehittymisen myötä oli mahdollista rakentaa prosessi, jossa matalapaineturbiinilta tulevan ilman sisältämä hukkalämpö hyödynnetään rekuperaattorissa. Rekuperaattorissa jäljellä olevalla hukkalämmöllä lämmitetään turbiineille virtaavaa ilmaa, jolloin saadaan vähennettyä fossiilisten polttoaineiden tarvetta ja parannettua hyötysuhdetta korkeamman paisuntalämpötilan ansiosta. McIntoshin laitos Yhdysvalloissa on hyvä esimerkki laitoksesta, jossa matalapaineturbiinin ulostulon hukkalämpö on hyödynnetty. Kompressorin nimellisteho on 50 MW ja turbiinien 110 MW. Laitoksen kokonaishyötysuhde on 54 %. Varaston lataaminen täyteen kestää noin 38 tuntia ja tyhjäksi purkautuminen noin vuorokauden. McIntoshin laitoksessa on yksi maanalainen paineilmaparasto, jonka kokonaistilavuus 560 000 m³. Prosessipaine vaihtelee 45-74 baarin välillä ja turbiinin sisääntulolämpötilat vaihtelevat 538°C aina 871°C. Merkittävänä erona Huntorfin laitokseen on erityisen pieni turbiinin massavirta. Massavirta on 154 kg/s, mikä on melkein kolme kertaa pienempi Huntorfin laitokseen verrattuna. McIntoshin laitoksen käynnistysaika on normaalisti 12 minuuttia. Hukkalämmön talteenoton ansiosta ulostulolämpötila on 370°C, mikä on noin 100 astetta alhaisempi kuin Huntorfin laitoksessa. McIntoshin laitos tuottaa energiaa 2860 MWh vuodessa, mikä on huomattavasti enemmän kuin Huntorfin tuottama 580 MWh (IRENA 2017, 55). Kuvassa 8 on esitettyä mahdollinen paineilmaparaston prosessikuva hukkalämmön talteenotolla. (Budt et al. 2016, 261.)



Kuva 8. Yksinkertaistettu paineilmaraston prosessikuvaaja hukkalämmön talteenotolla (mukaiillen Zhou et al. 2018, 166)

Yleisesti katsoen maakaasulla toimivien paineilmarastojen energiatiheys vaihtelee 30-60 Wh/kg. Käynnistysaika on arviolta 10-15 minuuttia ja toiminta-alue 5-1000 megawatin välillä (Budt et al. 2016, 254). Zykeri ja Syri määrittelevät maanalaisten paineilmarastojen kokoluokan huomattavasti alhaisemmaksi noin 5-400 megawatin välille. Purkausaika voi käytännössä vaihdella millisekunneista jopa vuorokauteen, kuitenkin kannattava purkausaika on yleensä muutamia tunteja. Varastointiaika vaihtelee tunneista kuukausiin, ja prosessilla on pienet varastointihäviöt vuorokauden aikana. Paineilmavaraston tavanomainen käyttöaika on 20-40 vuotta, ja latauskerrat yli 13 000 kappaletta käyttöään aikana. (Zakeri & Syri 2014, 590-593.)

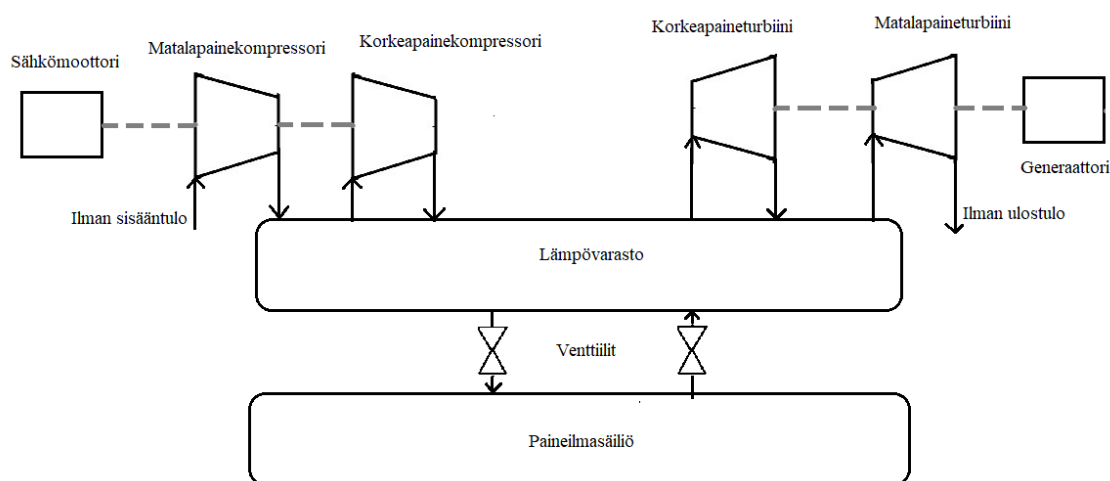
Yleisesti suuren kokoluokan paineilmarastojen kokonaiskustannukset vaihtelevat 1286-1388 €/kW välillä, mutta ovat tavallisesti nimellistehoa kohden noin 900 €/kW. Ominaiskustannushinnaksi on arvioitu 210-278 €/kWh. Maan päälle sijoitetut paineilmarastot ovat investointikustannuksiltaan usein edullisempia, mutta mahdollinen varastointikapasiteetti on yleensä huomattavasti pienempi. Maanpäällisten

varastojen hinnat vaihtelevat 774-914 €/kW. Näin ollen ominaiskustannushinnaksi paineilmavarastoille muodostuu arviolta 48-106 €/kWh. Hinnat on laskettu tavallisimmille suuren kokoluokan maanalaisille paineilmavarastoille, jotka toimivat maakaasulla. Keskimääräiseksi ja kannattavaksi varastointiajaksi on arvioitu kahdeksan tuntia. Kustannuksissa ei ole otettu huomioon sähkön siirron aiheuttamia kustannuksia. Ilman lämmittämiseen käytetyn polttoaineen hinnaksi on arvioitu tutkimuksessa 8-20 €/MWh ja päästöoikeuksien hinnaksi 18-22 €/t CO₂. Polttoaineen hintojen vaihtelu ja odotettu päästöoikeuksien hintojen nousu 3-12 €/t CO₂ vuoteen 2021 tulevat nostamaan fossiilisilla polttoaineilla toimivien paineilmavarastojen kokonaiskustannuksia (Carbon Tracker 2018). Ominaiskustannushintaan vaikuttaa paineilmavaraston vuosittainen käyttöaika, joten hinta on karkea arvio tavanomaisella käyttöajalla. Hintojen ennustettua nousua lisäksi muuttaa teknologian mahdollinen halventuminen tulevaisuudessa. (Zakeri & Syri 2014, 590-593.) Tähän pohjautuen kustannuksista on tehty muitakin arvioita ja esimerkiksi International Renewable Energy Agency (2016, 56) arvioi ominaiskustannushinnaksi 47 €/kWh ja vuoteen 2030 mennessä hintojen laskevan 39 €/kWh.

4.2 Adiabaattinen paineilmavarasto

Uusin paineilmavarastointitekniologia tunnetaan nimellä AA-CAES eli Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage. Kyseinen tekniologia on vasta kehitysvaiheessa, mutta aiheesta on julkaistu useita teknisiä suunnitelmia. Tärkeimpänä erona tavalliseen paineilmavarastoon on se, että kompressorissa tapahtuu adiabaattinen eli lämpöhäviötön puristus. Kaksivaiheisen kompressorin puristuksen jälkeen paineilma jäähdytetään niin, että puristuksessa syntyvä lämpö otetaan talteen lämpövarastoon. Varastoitu lämpöenergia hyödynnetään myöhemmin ilman esilämmityksessä matalapaineturbiinilta saatavan hukkalämmön kanssa. Kyseinen muutos prosessissa mahdollistaa kaksi asiaa. Ylimääräisen lämmön hyödyntämisen seurauksena prosessin hyötysuhde saadaan kasvatettua perinteistä paineilman varastointitekniologiaa huomattavasti paremmaksi. Adiabaattisen varaston teoreettinen hyötysuhde 60-70 %, kun jo aiemmin esitellyn perinteisen prosessin hyötysuhde on 42-54 %. (Komarnicki et al.

2017, 154; Budt et al. 2016, 254). Toiseksi se mahdollistaa, että energiavarasto voi toimia ilman polttoainetta. Prosessi toimii näin ollen ilman fossiilisia polttoaineita ja polttokammio on korvattu lämpövarastolla, mikä tekee prosessista yksinkertaisemman, ja käytännössä hiilidioksidivapaan. Kuvassa 9 on esitettyä adiabaattisen paineilmavaraston yksi mahdollinen prosessikierto ja pääkomponentit. (Bullough et al. 2004, 2; Budt et al. 2016, 260-261; Komarnicki et al. 2017, 154.)



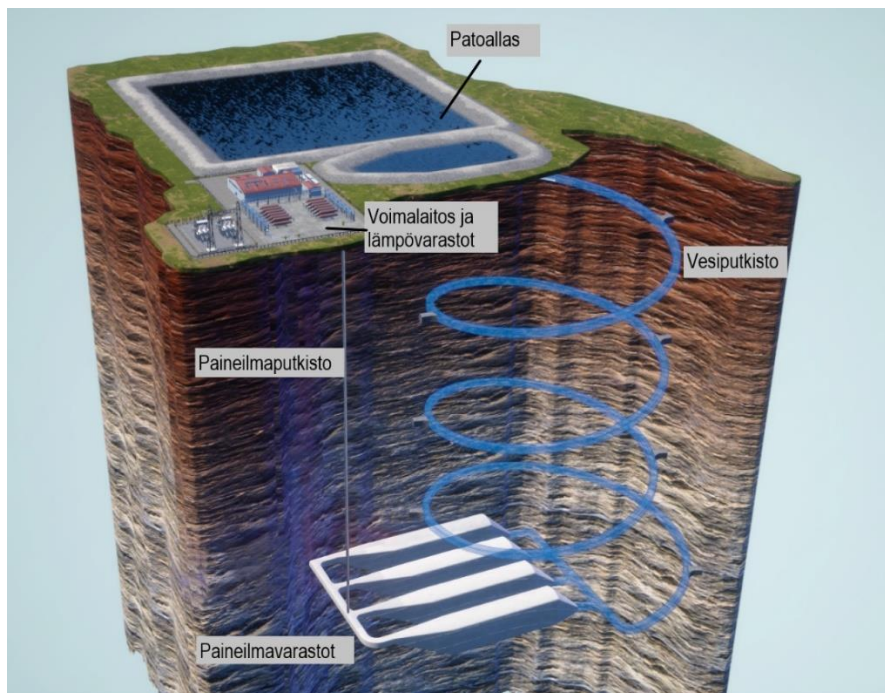
Kuva 9. Yksinkertaistettu prosessikuva adiabaattisesta paineilmavarastosta (mukaiillen Zhou et al. 2018, 166)

Useissa lähteissä adiabaattisesta paineilmavarastosta puhuttaessa tarkoitetaan prosessia, jossa korkeapainekompressorilla ilman lämpötila kohoaa 580-650 °C ja puristuksen jälkeinen paine kasvaa 60-72 baariin. (Budt et al. 2016,261; Komarnicki et al. 2017, 154.) Marcus Budtin ja muiden mukaan (2016, 260-261) adiabaattisten paineilmavarastojen prosessilämpötilat voivat kuitenkin vaihdella hyvin matalista alle 200 °C aina yli 400°C. Adiabaattisissa paineilmavarastoissa puristuksen jälkeen ilma jäädytetään noin 50 °C varastointilämpötilaan (Komarnicki et al. 2017, 154). Toimintaperiaatteeltaan AA-CAES on muuten hyvin samanlainen kuin paineilmavarasto, jossa lämmityksen lähteenä käytetään fossiilisia polttoaineita. Komponenteista vain polttokammio on korvattu lämpövarastolla. Suurimmat erot ovat prosessipaineissa ja lämpötiloissa. Yleensä adiabaattisten paineilmavarastojen turbiinille menevän ilman lämpötilat ovat

alhaisemmat johtuen siitä, että ilma lämmitetään vain hukkalämmön avulla. Arvioitu adiabaattisten paineilmavarastojen energiatiheys vaihtelee 0,5-20 kWh/m³ välillä ja käynnistysajan on arvioitu olevan 5-15 minuuttia. Kokoluokaltaan suuret varastot vaihtelevat 1 MW-1GW välillä. (Budt et al. 2016, 254.)

Adiabaattiset paineilmavarastot ovat vasta kehitysvaiheessa, joten useita toiminta-arvoja on hankalaa määrittää tarkasti. Tällä hetkellä kaupallisesti myynnissä on nimellisteholtaan 50 MW varastoista aina yli 500 MW varastokokonaisuuksiin. Yhden kompressori-turbiiniprosessin kokoluokka voi vaihdella 5-250 MW. Kyseisten paineilmavarastojen round trip -hyötysuhteen on ilmoitettu olevan yli 60 % ja mahdollinen varastointiaika vaihtelee 4 tunnista yli 24 tuntiin. Käyttöäiksi on määritetty yli 50 vuotta, joka tarkoittaa noin 20 000 latauskiertoa. Markkinoilla olevat paineilmavarastot pystyvät valmistajien mukaan tasoittamaan jopa 65 MW/min muutoksia sähkön tuotannossa tai kulutuksessa. Käynnistysaika vaihtelee 3-5 minuutin välillä. Energiatiheydeksi on arvioitu 0,5-20 kWh/m³ (Budt et al. 2016, 254). Adiabaattisten paineilmavarastojen kokonaiskustannukset vaihtelevat karkeasti 1300 €/kW aina 2650 €/kW asti, riippuen sijainnista ja käytetystä teknologiasta. Kustannusarviot on tehty arvioiden vuosittaisen käyttöajan olevan noin 10 tuntia. (Hydrostor 2018a, 1-6.)

Kuvassa 10 on esitettyinä markkinoilla olevan AA-CAES varaston konkreettinen rakenne. Aiemmin kuvassa 9 esiteltyyn paineilmavarastoon verrattuna erona on se, että paineistettua ilmaa johdetaan turbiineille patoaltaan vedenpainetta hyödyntäen. Kyseistä teknologiaa hyödyntäviä projekteja on rakenteilla useita, esimerkiksi vuonna 2019 myönnettiin 9 miljoonan dollarin rahoitus 5 MW adiabaattisen paineilmavaraston rakentamiselle osaksi Australian kantaverkkoa (Hydrostor 2019).



Kuva 10. Kehittyneen adiabaattisen paineilmavaraston konkreettinen rakenne (mukaillen Hydrostor 2018b)

4.3 Isoterminen paineilmavarasto

Isotermisessä prosessissa puristuksen aikana lämpötila pyritään pitämään ympäristön lämpötilassa. Näin kompressorin vaatima teho on huomattavasti pienempi. Kaikki tunnetut konseptit isotermisistä paineilmavarastoista perustuvat Budtin tekemän selvityksen (Budt et al. 2016, 264-265) mukaan mäntäkompressoreihin. Mäntäkompressorit mahdollistavat hitaan puristus- ja paisuntaprosessin, joka antaa tarpeeksi aikaa lämmön johtumiseen koneen sisällä. Isotermiset paineilmavarastot ovat vielä kehitysvaiheessa ja niistä on vasta kehitetty erilaisia pienen kokoluokan malleja.

Yksi malleista on niin sanottu Hydro-Pneumatic Energy Storage, jossa ilmaa puristetaan nesteen, kuten esimerkiksi öljyn avulla. Öljyä pumpataan nestemännän avulla paineilmasäiliöön, jonka seurauksena ilmanpaine kasvaa. Sähköä tarvittaessa venttiili avataan, ja öljyn annetaan virrata pumpputurbiiniin läpi kaasun työntäessä öljyä. Prosessin sisään- ja ulostulotehoa rajoittaa lämmönsiirtopinta kaasun ja nesteen välillä.

Isoilla tehoilla lämpötilagradienttien kasvaessa prosessin hyötysuhde laskee, eikä prosessi ole enää isoterminen. Tästä syystä joudutaan käyttämään rakenteeltaan monimutkaisempia kompressoreita. Tietyissä tilanteissa heikkoutena on myös systeemin alhainen energiatiheys. (Budt et al. 2016, 264-265.)

Isotermiselle prosessilla saavutettu hyötysuhde on 38 %, mutta teoreettisesti mahdollinen hyötysuhde on yli 80 %. Tämä tarkoittaa sitä, että teoreettisesti korkein energianvarastointihyötysuhde olisi mahdollista saavuttaa isotermisellä prosessilla. Isotermisen paineilmavaraston arvioitu energiatiheys on 1-25 kWh/m³ luokkaa ja käynnistysaika alle minuutin. Nimellisteho vaihtelee isotermisillä paineilmavarastoilla 0,1-10 MW välillä. Isotermiset paineilmavarastot ovat yksi teoreettinen vaihtoehto muille paineilmavarastoille, mutta niiden kehittäminen on ollut vähäistä verrattuna muihin teknologioihin. (Budt et al. 2016, 254; Gallo et al. 2016, 815.)

4.4 Pienen kokoluokan paineilmavarastot

Pienen kokoluokan paineilmavarastoilla tarkoitetaan esimerkiksi alle 5 kW nimellisteholtaan olevia paineilmavarastoja. Yleensä pienen kokoluokan energiavarastoiksi parhaiten soveltuvat sähkökemialliset varastot, kuten akut ja paristot. Kyseisillä varastoilla on kuitenkin lyhyt käyttöikä, jonka aikana varastointikapasiteetti yleensä heikentyy. Tästä syystä vaihtoehtoiset varastointimenetelmät, kuten pienen kokoluokan paineilmavarastot ovat kilpailukykyinen vaihtoehto (Venkataramani et al. 2018, 364). Pienen kokoluokan paineilmavarastoja on suunniteltu esimerkiksi harvaan asutetuille alueille. Tähän liittyen on tehty tutkimuksia, joissa testataan paineilmavarastojen toimivuutta integroituna osaksi pientalojen lämmitysjärjestelmiä. Paineilmavaraston avulla varastoidulla sähköllä pystyttäisiin kattamaan esimerkiksi pellettikäyttöisen lämmitysjärjestelmän itsenäinen toiminta hätätilanteissa (Komarov et al. 2018, 1-6). Kyseinen järjestely olisi hyödyllinen kylmillä aluilla, joissa ei ole saatavilla kaukolämpöä ja sähkön toimitusvarmuus on huono. Toinen sovelluksen kohde on pienen kokoluokan uusiutuvan energian tuotanto. (Jubori & Jawad 2019, 224, 226, 238.)

Pienen kokoluokan paineilmavaraston toiminta-arvot poikkeavat paljon suuren kokoluokan paineilmavarastoista. Juborin ja Jawadin tekemässä tutkimuksessa (2019, 224-238) prosessissa käytetyn ilman massavirta oli vain 0,05 kg/s, prosessipaine 3,5 bar ja turbiinin sisääntulolämpötila 500 K. Tutkimuksesta huomataan, että pienessä kokoluokassa suurin osa toiminta-arvoista on huomattavasti alhaisempia verrattuna suuren kokoluokan paineilmavarastoihin. Tutkimuksessa käytettiin radiaaliturbiinia ja round trip -hyötysuhteeksi saatiin 59 %. Vastaavasti Venkataramanin tekemässä tutkimuksessa (Venkataramani et al. 2018) testattiin pienen kokoluokan paineilmavaraston soveltuvuutta osaksi tuulivoimalaa. Paineilmavarastossa ei ollut lämmön talteenottoa puristusvaiheessa, mikä pienentää kokonaishyötysuhdetta merkittävästi. Tutkimus suoritettiin useilla eri massavirroilla ja tutkimuksessa käytetty massavirta vaihteli 0,005 kg/s-0,01 kg/s välillä. Round trip -hyötysuhteeksi saatiin pienimmällä massavirralla 13,4 % ja suurimmalla noin 22,0 %. Tutkimustuloksien perusteella huomataan, että pienen kokoluokan paineilmavarastojen toiminta-arvojen muutokset vaikuttavat merkittävästi prosessin hyötysuhteeseen. Prosessin hyötysuhteeseen vaikuttavat massavirran lisäksi pienetkin muutokset prosessilämpötilassa, paineessa tai pyörimisnopeuksissa.

Suurin haaste tällä hetkellä on saada prosessin paisunta ja puristus riittävän tehokkaiksi. Prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa nostamalla varastointipainetta ja minimoimalla prosessissa tapahtuvat painehäviöt. Korkea varastointipaine tuo kuitenkin erilaisia haasteita liittyen esimerkiksi paineilmavarastossa käytettäviin materiaaleihin. Tulevaisuutta varten tulee kehittää vielä parempia turbiineita, joiden avulla paisunnan häviöt saadaan minimoitua myös matalilla paineilla ja pienillä massavirroilla. Hidasteita pienien paineilmavarastoiden kehitykselle ja käyttöönotolle ovat näin ollen alhainen round trip -hyötysuhde ja tekniset haasteet. (Jubori & Jawad 2019, 238; Venkataramani et al. 2018, 264.)

5 MEKAANISET ENERGIAVARASTOT OSANA TULEVAISUUDEN ENERGIASEKTORIA

Tässä osuudessa käsitellään mekaanisten energiavarastojen roolia erityisesti tulevaisuuden energiantuotannossa ja selvitetään varastointimenetelmien sähkön hintojen suuruusluokat. Lopuksi pohditaan energiavarastojen energiaturvallisuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

5.1 Energiasektori

Perinteisen sähköverkon tavoitteena on lähettää ja jakaa sähköä. Sähköä pyritään tuottamaan nykyisin sen hetkellisen kulutuksen mukaan. Tulevaisuudessa sähköverkon rakenne muuttuu kohti älykstä sähköverkkoa. Smart grid eli älykäs sähköverkko on innovaatio, joka mahdollistaa sähkön tehokkaamman jakelun taloudellisesta ja teknisestä näkökulmasta katsottuna. Perinteiseen sähköverkkoon verrattuna älykkään sähköverkon perustana on energian varastointi, reaaliaikainen viestintä ja reaaliaikainen päätöksenteko tietoliikenteen avulla. Sähköverkon tilannetta mitataan jatkuvasti useiden sensoreiden ja mittalaitteiden avulla. Tämä mahdollistaa poikkeuksien havaitsemisen ja ratkaisemisen nopeasti. Smart grid tunnistaa sähkön tuottajat ja kuluttajat, sekä perinteiseen verkkoon verrattuna sähkön tuotanto on enemmän hajautettua. Älykkään verkon tarkoituksena on, että myös pienet sähköverkkoon kytketyt yksiköt voivat olla samaan aikaan sähkön tuottajia ja kuluttajia. Älykäs sähköverkko mahdollistaa energiatehokkaamman sähkön jakelun, vakaamman sähköverkon toiminnan ja uusiutuvan energian kapasiteetin lisäämisen. Smart grid -sähköverkko mahdollistaa myös kysyntäjouston parantumisen. Älykstä sähköverkkoa on kuitenkin kritisoitu tieto- ja kyberturvallisuuden heikkouksista ja monimutkaisuudestaan etenkin suuressa mittakaavassa. (Goel et al. 2015, 1-9; Tuballa et al. 2016, 712-715.)

Älykkään sähköverkon myötä hajautetun energiantuotannon kapasiteetin määrä lisääntyy ja sähköverkon joustavuuden parantamiseksi tarvitaan uusia energiavarastoja. Uusiutuvan energian määrän kasvu lisää energiavarastojen tarvetta toimia peruskuormana

ja huippukuorman tasoittamisessa. Näiden lisäksi ne tulevat korvaamaan taajuussäädössä muita energianlähteitä. Esimerkiksi tuulivoimalla tuotetun sähkön määrä vaihtelee jatkuvasti, ja näin ollen sen aiheuttamaa taajuusvaihtelua joudutaan tasoittamaan toisen energianlähteen avulla. Tähän tarkoitukseen toimivat erityisen hyvin paineilmavarastot ja pumpatut vesivarastot (Rehman et al. 2015, 587-593).

Älykäs sähköverkko asettaa myös omat vaatimuksensa energiavarastoille, sillä se tarvitsee energiavarastoja, jotka toimivat käynnistysapuna verkon toimintahäiriöissä. Älykäs sähköverkko tarvitsee lisäksi energiavarastoja, jotka varmistavat esimerkiksi sensoreiden katkeamattoman sähkön saannin. Näin on mahdollista seurata verkon toimintaa reaaliajassa. Vauhtipyörät soveltuvat erinomaisesti edellä mainittuihin vaatimuksiin, sillä niillä pystytään kattamaan esimerkiksi paikallinen taajuudensäätö tai varmistamaan sähköllä toimivien prosessien katkeamaton toiminta (Beacon Power 2018d). Älykkään sähköverkoston käyttöönoton myötä suuren kokoluokan energiavarastojen ohelle pyritään kehittämään myös pienempiä energiavarastoja, jotka voidaan sijoittaa paremmin osaksi hajautettua energiantuotantoa tai asutusta.

Adiabaattiset paineilmavarastot pystyvät tulevaisuudessa korvaamaan fossiilisilla polttoaineilla toimivia voimalaitoksia energiantuotannossa. Tämä johtuu siitä, että ylimääräinen energia ja uusiutuvat energialähteet voidaan käyttää paremmin hyödyksi, jolloin voimalaitoksilla tuotetun sähkön tarve vähenee. Tilanne pätee vain, jos sähkön kokonaiskulutus pysyy samana tai laskee vuosittain. Paineilmavarastoiden etuna tässä tilanteessa tulee olemaan se, että niitä on helppo integroida jo olemassa olevaa infrastruktuuriin. Paineilmavarastoja voidaan rakentaa esimerkiksi käytöstä poistuviin voimalaitoksiin tai kaivoksiin. Tämä helpottaa paineilmavarastojen käyttöönottoa ja parantaa mahdollisuutta käyttää uusiutuvaa energiaa peruskuormana. Paineilmavarastot tulevat näin ollen muiden energiavarastojen ohella vähentämään polttoaineiden kustannusten osuutta energiantuotannossa. (Hydrostor 2018a, 3.)

Energiavarastojen merkittävyyttä osana energiasektoria ja uusituvan energian tuotantoa on myös kritisoitu, vaikka esimerkiksi ympäristöön kohdistuvat vaikutukset ovat

tutkimusten mukaan huomattavasti alhaisemmat (Bouman et al. 2016). Amory Lovinsin esittämän teorian mukaan sähkön tuotanto voisi olla mahdollista paikallisesti pelkällä uusiutuvalla energialla ilman suuria energiavarastoja. Energian mahdolliseen varastointiin ja kysynnän tasoittamiseen käytettäisiin esimerkiksi sähköautoja. Lovinsin mukaan emme tarvitse koko vuorokauden ajalle tasaisesti jakautuvaa perustuotantoa tai suuria energiavarastoja varmistamaan energian saatavuutta, sillä nykyisin on mahdollista ennustaa sähkön kysyntä ja uusiutuvan energian tuotanto tarkasti etukäteen (Lovins 2014).

5.2 Sähkön hinta

Energiavarastot tulevat vaikuttamaan tulevaisuudessa sähkön hinnan muodostumiseen. On hankala sanoa pienentävätkö energiavarastot sähkön siirron kustannuksia, sillä mahdollisesti välimatkat energiavarastojen ja asutusten välillä voivat kasvaa suuriksi, mutta parhaimmillaan paineilmavarastot voidaan sijoittaa siten, että sähköverkoston laajentamisen tarve pienenee ja sähkönsiirtokustannukset eivät kasva. Sähkön hinta vaihtelee valtioittain esimerkiksi verotuksen takia. Varastoidun sähkön myyntihintaan vaikuttaa paljon myös, se minkä hintaista sähköä varastoidaan ja millä teknologialla. Zakerin ja Syrin tekemässä tutkimuksessa (2014, 588) on tehty arvioita energiavarastojen sähkön hinnalle. Tutkimuksessa on käytetty energiavarastojen käyttöikäkustannusten korkokantana 8 % ja syötetyn sähkön hintana 5 snt/kWh. Tutkimuksessa oletetut latausjaksot vuoden aikana ovat 250 kappaletta. Taulukossa 1 on esiteltyä tutkimuksen pohjalta mekaanisten energiavarastojen sähkön hintoja suuressa kokoluokassa. Hinnat ovat arvioita varastoille, jotka toimivat peruskuormana sähköverkossa. Sähkön hinta-arvioita ei ole esitetty vauhtipyörille, sillä ne eivät sovellu peruskuorman tuottamiseen. Adiabaattiselle paineilmavarastolle hinta-arviot perustuvat Verena Jülchin tekemään tutkimukseen (2016, 1600-1602) lyhyen aikavälin energianvarastoinnista. Tutkimuksessa sähkön hintana käytettiin 3 snt/kWh ja latauskertoina 365. (Zakeri & Syri 2014,588.)

Taulukko 1. Mekaanisten energiavarastojen pääomakustannukset ja sähkön hinta (Berrada et al. 2017, 324; Jülch 2016, 1600-1602; Zakeri & Syri 2014, 588, 592)

Varastointimenetelmä	Tasoitettu sähkön myyntihinta [€/MWh]	Varastoinnin osuus sähkön hinnasta [€/MWh]
PHSS	120	70
Maanalainen D-CAES	134	84
Maanpäällinen D-CAES	159	109
AA-CAES	135	105
Painovoimavarasto	123	73

Taulukosta 1 nähdään, että varastoinnin kustannukset muodostavat merkittävän osan varastoiduin sähkön hinnasta. Tästä syystä on hyvä huomioida, että varastoinnin kustannukset ja sähkön hinta riippuvat merkittävästi siitä, kuinka paljon varastoja käytetään. Mitä enemmän varastoja käytetään, sitä halvemmat ovat varastointikustannukset (Jülch 2016, 1600-1602). Sähkön hintojen tarkempi tarkastelu on siis järkevää vain tapauskohtaisesti esimerkiksi tietyn valtion sisällä, jossa konkreettinen hinnan muodostaminen on mahdollista. Zakeri ja Syrin tutkimuksen (2014) mukaan pumpatut vesivarastot ja paineilmavarastot ovat halvimmat energian varastointiteknologia ja kustannukset voivat laskea varastoinnin osalta jopa 54-71 €/MWh. Verena Jülchin (2016, 1594-1605) tekemä tutkimus varmistaa, että pumpatut vesivarastot ja paineilmavarastot ovat edullisin vaihtoehto lyhyen aikavälin ja suuren kokoluokan energianvarastointiin. Jülchin tutkimuksen tulokset kuitenkin osoittavat vastoin aiempia tuloksia, että pitkän aikavälin energianvarastoinnissa ja 100 megawatin kokoluokassa power-to-gas -teknologia on mekaanisia energiavarastoja edullisempi vaihtoehto. Taulukosta voidaan myös päätellä, että varastointi tulisi nostamaan sähkön hintaa merkittävästi. Hintojen nousua kuitenkin tasoittaa uusiutuvan energian määrän lisääntyminen, sillä uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön hinta voi olla huomattavasti halvempi kuin voimalaitoksilla tuotetun sähkön.

5.3 Energiaturvallisuus

Mekaanisten energiavarastojen roolin kasvaessa osana energiasektoria, on tärkeää huomioida energiavarastojen energiaturvallisuus. IEA:n mukaan energiaturvallisiksi lähteiksi määritellään jatkuvasti saatavilla olevat ja kohtuullisen hintaiset energianlähteet (IEA, 2019c). Energiaturvallisuuteen ja energian toimitusvarmuuteen vaikuttaa useat eri tekijät, joita ovat esimerkiksi energian saatavuus, energianlähteiden monimuotoisuus, hinta, ympäristövaikutukset, käytetty teknologia sekä energian tuotannon ja varastoinnin tehokkuus. Energiaturvallisuuden kannalta pumpattujen vesivarastojen vahvuutena on esimerkiksi niissä käytetty yksinkertainen teknologia, joka parantaa sähkön toimitusvarmuutta. Lisäksi teknologia on pitkälle kehitetty ja se ollut käytössä jo kauan. Pumpattujen vesivarastojen kiertoaineena toimiva vesi on turvallinen kiertoaine, joka mahdollistaa luonnon esiintymien hyödyntämisen patoaltaina. Kiertoaineen hyvä saatavuus parantaa näin energiaturvallisuutta. Pumpattujen vesivarastojen energiaturvallisuutta parantaa tämän lisäksi niiden ympäristöystävällisyys ja mahdollisuus joustavaan käyttöön. Varastointiprosessi on käytännössä päästötön, ja varastojen käynnistysaika on korkeintaan muutamia minuutteja. Toisaalta energiaturvallisuutta heikentää tekniset vaatimukset, kuten vaatimukset putouskorkeudesta ja patoaltaiden pinta-alasta. Vaatimusten seurauksena energiavaraston sijainnin etäisyys kuluttajiin voi kasvaa pitkäksi, mikä heikentää sähkön siirron katkeamattomuutta. (Azzuni & Breyer 2018, 242-243.)

Energiaturvallisuuden kannalta paineilmarastojen vahvuutena on kiertoaineen hyvä saatavuus ja teknologian monimuotoisuus. Ilman lisäksi tulevaisuudessa pystytään kehittämään prosesseja, joissa toimii jokin muu kiertoaine, kuten vety. Adiabaattisen varaston toimitusvarmuutta lisää se, että erillistä polttoaineenlähdeä ei tarvita. Energiaturvallisuutta rajoittaa kuitenkin tarkat vaatimukset sijainnille, jos maanalaisia luolastoja käytetään paineilmarastoina. Pitkät matkat väestökeskittymiin ovat riski jatkuvalla energiansaannille. Paineilmarastot vaativat tietyntyyppiset paine- ja lämpötilaolosuhteet, jotta prosessista saadaan tehokas. Tämä hankaloittaa entisestään maantieteellisesti sopivien paikkojen löytämistä. Paineilmarastojen

ympäristövaikutukset voidaan minimoida käyttämällä adibaattisia paineilmavarastoja esimerkiksi osana tuulivoimalaitosta. Tällöin päästöjä ei synny energiantuotannosta, ja prosessissa käytetty ilma ei aiheuta ympäristölle vahinkoja. Negatiivisena ympäristövaikutuksena on kuitenkin mahdollinen rakennusvaiheessa tapahtuva ympäristön muokkaus ja rakentamiseen tarvittavat raaka-aineet. (Azzuni & Breyer 2018, 242-243.)

Taloudellisesta näkökulmasta katsottuna perinteisten paineilmavarastojen riippuvuus fossiilisista polttoaineista heikentää niiden kilpailukykyä tulevaisuuden energiamarkkinoilla. Lisäksi fossiilisten polttoaineiden rajallinen saanti on tulevaisuuden uhka energiaturvallisuudelle. Polttoaineiden toimitusvarmuutta voidaan kuitenkin parantaa kehittämällä prosessi, jossa hyödynnetään esimerkiksi biopolttoaineilla toimivia paineilmavarastoja. Abdelrahman Azzunin ja Christian Bayerin tekemän tutkimuksen (Azzuni & Bayer 2018) mukaan mekaaniset energiavarastot, kuten PHSS ja CAES ovat vähiten energiaturvallisista teknologioita verrattuna muihin energianvarastointimenetelmiin. Tämä johtuu esimerkiksi varastojen suurista investointikustannuksista. Paineilmavarastojen on oltava toiminnassa kymmeniä vuosia, jotta investointikustannukset saadaan maksettua takaisin. Takaisinmaksun varmuutta heikentää se, että paineilmavarastot ovat alttiita vesivarastojen tapaan paikallisille uhkille, kuten maanjäristyksille. Energiavarastot ovat myös helppo kohde esimerkiksi mahdolliselle sabotaasille, ja lisäävät sähköverkkojen haavoittuvuutta. (Azzuni & Breyer 2018, 251-253.)

Vauhtipyörien energiaturvallisuutta parantaa niiden laaja käyttöalue ja alhaiset rakennusvaatimukset. Ainoana vaatimuksena on turvarakennelmat, mutta ne parantavat samalla ympäristön turvallisuutta. Energiaturvallisuutta parantaa myös käytetyn teknologian yksinkertaisuus, päästöttömyys, helppo huollettavuus ja mahdollisuus tehdä vauhtipyöriä useista eri materiaaleista. Säännöllinen huollontarve heikentää kuitenkin energiaturvallisuutta. Toinen energiaturvallisuutta heikentävä tekijä ovat suuret varastointihäviöt vuorokauden aikana. Tämä tarkoittaa sitä, että vauhtipyörille voidaan taata jatkuva sähkön saanti vain lyhyillä varastointiajoilla.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää mekaanisten energiavarastojen toimintaperiaatteet ja niiden soveltuvuus osana energiasektoria. Työ keskittyi suurimmaksi osaksi suuren kokoluokan energiavarastoihin. Tutkimus mahdollistaa paremman esittelyn energiavarastoista opetus- ja tutkimustarkoituksessa. Työn pohjalta voidaan hahmottaa mekaanisten energiavarastojen etuja, haittoja ja soveltuvuutta erilaisiin käytännön tilanteisiin. Työssä muodostettiin kattava kuva eri teknologioiden keskeisistä toiminta-arvoista. Tutkimusten pohjalta nousi esiin mahdollinen jatkotutkimuksen tarve biopolttoaineiden toimivuudesta osana paineilmaparastoja sekä mahdollisesti vedyn hyödyntäminen paineilmaparastojen kiertoaineena.

Tulevaisuuden kannalta merkittäviä mekaanisia energiavarastoja ovat pumpatut vesivarastot, painovoimavarastot, adiabaattiset paineilmaparastot ja vauhtipyörät. Pumpattujen vesivarastojen ja painovoimavarastojen energianvarastointi perustuu sähköön muuntamiseen potentiaalienergiaksi. Paineilmaparastoissa sähkö käytetään ilman paineistamiseen, ja ilmaan sidottu energia voidaan myöhemmin muuttaa takaisin sähköksi kaasuturbiinitekniikkaa hyödyntämällä. Vauhtipyörissä sähkö käytetään vauhtipyörän liike-energian kasvattamiseen, ja tarvittaessa liike-energia voidaan muuttaa generaattorin avulla takaisin sähköksi. Sähkön pitkäaikaiseen varastointiin suuressa kokoluokassa soveltuvat erityisen hyvin pumpatut vesivarastot ja paineilmaparastot. Kyseisten energiavarastojen varastointiajat vaihtelevat yleensä tunneista jopa kuukausiin. Varastojen käyttötarkoituksia ovat huippukuormitusten tasoittaminen, peruskuorman tuottaminen, verkon taajuuden säätö ja käynnistysapua toimiminen verkon tai voimalaitoksen toimintahäiriöissä. Lyhyen aikavälin energiavarastoiksi soveltuvat vauhtipyörät, ja varastointiaika vaihtelee sekunneista tunteihin. Vauhtipyörät soveltuvat parhaiten sähköverkon taajuuden säätöön, suurta tehoa vaativiin sovelluksiin ja katkeamattoman sähkön saannin varmistamiseen. Taulukossa 2 on esitettyä kooste työssä käsiteltyjen energiavarastojen toiminta-arvoista. Taulukoissa ilmoitetut arvot perustuvat pääsääntöisesti kirjallisuuslähteiden ilmoittamiin teoreettisiin arvoihin. Lisäksi paineilmaparastoille (CAES) on ilmoitettuna sulkeissa tällä hetkellä käytössä tai

myynnissä olevia nimellistehoja. Hyötysuhteiden kohdalla sulkeissa on ilmoitettuna tällä hetkellä käytännössä saavutetut hyötysuhteet. Vauhtipyörille on ilmoitettuna yhden vauhtipyörän nimellistehojen suuruusluokkia. Vauhtipyöristä koostuvien energiavarastojen kokonaisteho voi olla jopa kymmeniä megawatteja (Beacon Power, 2018c).

Taulukko 2. Mekaanisten energiavarastojen toiminta-arvot (Budt et al. 2016, 254-261; Hydrostor 2018a; Komarnicki et al. 2017, 134-136; Rehman et al. 2015; Zakeri & Syri 2014, 570-592)

Varasto	Teho [MW]	Hyötysuhde [%]	Varastointiaika	Käyttöikä [a]	Energiatiheys		Kokonais- kustannukset [€/kW]
					Wh/kg	kWh/m ³	
D-CAES	5-1000 (110-290)	89 (42-54)	h-kk	20-40	-	2-15	1286-1388*
AA-CAES	1-1000 (50-500)	>60	h-vrk	>50	-	0,5-20	1300-2650
I-CAES	<1000	80 (38)	h-vrk	>20	-	1-25	-
PHSS	10-5000	70-85	h-kk	50-60	0,5-1,5	-	1030-1675
Painovoima	40-150	80	h-kk	30-60	1,06	-	1000
Vauhtipyörä	>0,25	>80	s-h	15-20	5-100	-	590-1446

*maalaisilla paineilmaravastoilla

Korkeimpiin, jopa 85 %:n round trip -hyötysuhteisiin päästään pumpatuilla vesivarastoilla. Heikoimmat hyötysuhteet ovat isotermisillä ja pienen kokoluokan paineilmaravastoilla. Paineilmaravastoista adiabaattiset paineilmaravastot ovat uusin ja lupaavin teknologia, sillä ne eivät tarvitse ulkoista lämmönlähdettä, vaan hyödyntävät hukkalämpöä ilman esilämmityksessä. Mekaanisten energianvarastointimenetelmien etuina ovat niiden yksinkertaiset rakenteet ja varastointikapasiteetin säilyminen suurista latausmääristä huolimatta. Mekaanisten energiavarastojen etu on myös käytännössä päästötön energianvarastointiprosessi, poissulkien polttoaineella toimivat paineilmaravastot. Suurin osa mekaanisista energiavarastoista ei ole riippuvaisia esimerkiksi fossiilisista polttoaineista, mikä auttaa fossiilisten polttoaineiden vähentämisestä energiantuotannossa. Ekologisuus parantaa lisäksi mahdollisuutta saada esimerkiksi EU:n myöntämää taloudellista tukea energiavarastoille.

Suuren kokoluokan energiavarastojen heikkoutena ovat alhaiset energiatihedyydet ja suuret investointikustannukset. Korkeat investointikustannukset, siihen liittyvät riskit ja rahoituksen saaminen hidastavat energiavarastojen määrän kasvua. Energiavarastojen määrän kasvamista hidastaa myös älykkään sähköverkon aiheuttamat tekniset haasteet ja se, että moni teknologia on vielä vahvasti kehitysvaiheessa tai vasta siirtymässä kaupallisille markkinoille. Yhtenä haasteena on esimerkiksi se, että mekaaniset energiavarastot asettavat vaatimuksia ympäristölle, minkä takia sopivia rakennuspaikkoja väestökeskittymien läheltä on hankala löytää. Pienen kokoluokan paineilma-energiavarastojen heikkoutena ovat tekniset haasteet puristusprosessissa.

Yleisesti energiavarastojen osuus tulevaisuudessa kasvaa lisääntyneen uusiutuvan energian ja älykkään sähköverkon kehittymisen myötä. Ne eivät kuitenkaan tule olemaan yksin ratkaisu energiasektorin haasteisiin, vaan energiasektorin rakennetta on muutettava myös muilla keinoilla. Näitä keinoja ovat esimerkiksi energiatehokkaampien teknologioiden kehittäminen osaksi energiantuotantoa, ja ympäristöystävällisten ratkaisujen tukeminen verotuksella. Mekaaniset energiavarastot mahdollistavat sähkön tuotannon näkökulmasta paremman energiaturvallisuuden ja hintavaihtelujen tasaantumisen. Kehittyneen energiavarastoinnin myötä sähkön hinnat tulevat oletettavasti laskemaan koko vuorokauden aikana, vaikka tällä hetkellä varastoidun sähkön hinta olisi huomattavasti voimalaitoksessa tuotettua sähköä kalliimpaa. Energiantuotannon rakenne tulee myös muuttumaan, sillä uusiutuvia energianlähteitä voidaan käyttää paremmin energiantuotannon peruskuormalaitoksina. Näiden syiden seurauksena sähkönkulutusta voidaan kasvattaa esimerkiksi teollisuudessa. Sähkön kulutusta lisää myös esimerkiksi väestönkasvu ja teknologisoituminen.

Energiavarastot tulevat muuttumaan energiasektoria monimuotoisemmaksi ja tarjoamaan vaihtoehtoja sähköverkkojen joustavuuden parantamiseksi. Lähitulevaisuudessa uusiutuvalla energialla ei pystytä kattamaan kaikkea maailman energiankulutusta, mikä rajoittaa energiavarastojen rakentamista. Sähkön varastoinnissa pienen kokoluokan kilpailijoina toimivat pääsääntöisesti akut. Suuressa kokoluokassa mahdollisia tulevaisuuden kilpailijoita ovat lämpövarastot ja kemialliset energiavarastot.

LÄHDELUETTELO

Alanen, Raili & Koljonen, Tiina & Hukari, Sirpa & Saari, Pekka, 2003. Energian varastoinnin nykytila, [verkkojulkaisu]. VTT. [viitattu 12.12.2018]. Saatavilla: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>

Aneke, Mathew & Wang, Meihong, 2016. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, [verkkojulkaisu]. Applied Energy, vol. 179, 350-377. [viitattu 23.03.2019]. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.097>

Azzuni, Abdelrahman & Breyer, Christian, 2018. Energy security and energy storage technologies, [verkkojulkaisu]. Energy Procedia, vol. 155, 237-258. [viitattu 19.03.2019] Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.053>

Beacon Power, 2018a. System installation, [verkkosivu]. [viitattu 14.03.2018]. Saatavilla: <http://beaconpower.com/system-installation/>

Beacon Power, 2018b. Carbon Fiber Flywheels, [verkkosivu]. [viitattu 14.03.2018]. Saatavilla: <http://beaconpower.com/carbon-fiber-flywheels/>

Beacon Power, 2018c. Stephentown, New York, [verkkosivu]. [viitattu 14.03.2018]. Saatavilla: <http://beaconpower.com/stephentown-new-york/>

Beacon Power, 2018d. Unique Value, [verkkosivu]. [viitattu 14.03.2018]. Saatavilla: <http://beaconpower.com/unique-value/>

Berrada, Asmae & Loudiyi, Khalid & Zorkani, Izeddine, 2017. System design and economic performance of gravity energy storage, [verkkojulkaisu]. Journal of Cleaner Production, vol. 156, 317-326 [viitattu 23.03.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.043>

Budt, Marcus & Wolf, Daniel & Span, Roland & Yan, Jinyue, 2016. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent

developments, [verkkojulkaisu]. *Applied Energy*, vol. 170, 250-268. [viitattu 26.01.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108>

Bullough, Chris & Gatzen, Christoph & Jakiel, Christoph & Koller, Martin & Nowi, Andreas & Zunft, Stefan, 2004. Advanced adiabatic compressed air energy storage for the Integration of wind energy, [verkkojulkaisu]. [viitattu 26.01.2019]. Saatavilla: <https://www.nrc.gov/docs/ML1129/ML11294A554.pdf>

Carbon Tracker, 2018. Carbon Clampdown: Closing the Gap to a Paris-compliant EU-ETS, [verkkosivu]. [Viitattu 18.02.2019]. Saatavilla: <https://www.carbontracker.org/reports/carbon-clampdown/>

Crotogino, Fritz & Mohmeyer, Klaus-Uwe & Scharf, Roland, 2001. Huntorf CAES: More than 20 Years of Successful Operation, [verkkojulkaisu]. [viitattu 12.01.2019]. USA. Saatavilla: http://www.fze.uni-saarland.de/AKE_Archiv/AKE2003H/AKE2003H_Vortraege/AKE2003H03c_Crotogino_ea_HuntorfCAES_CompressedAirEnergyStorage.pdf

Demirel, Yaşar, 2016. Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling, [E-kirja]. [viitattu 04.01.2019]. DOI: 10.1007/978-3-319-29650-0

Energy Storage Association, 2019. Flywheels, [verkkosivu]. [viitattu 31.01.2019]. Saatavilla: <http://energystorage.org/energy-storage/technologies/flywheels>

European Political Strategy Centre, 2018. 10 Trends Reshaping Climate and Energy. [E-kirja]. [viitattu 12.12.2018]. European Union. DOI: 10.2872/847821

Franc, Jean-Pierre & Michel, Jean-Marie, 2015. Fundamentals of cavitation, [E-kirja]. [viitattu 30.01.2019]. Elsevier. ISBN 978-1-4020-2233-3. Saatavilla: <https://www.springer.com/us/book/9781402022326>

Gallo, A.B & Simões-Moreira, J.R & Costa, H.K.M & Santons, M.M & Moutinho dos Santos, E., 2016. Energy storage in the energy transition context: A technology review,

[verkkodokumentti]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 65, 800-822. [viitattu 20.03.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.028>

Goel, Sanjay & Hong, Yuan & Papakonstantinou, Vagelis & Kloza, Darius 2015. Smart Grid Security, [E-kirja]. [viitattu 14.02.2019]. DOI 10.1007/978-1-4471-6663-4

Gravity Storage, 2019a. Investment cost of Gravity Storage, [verkkosivu]. [viitattu 17.03.2019]. Saatavilla: <https://heindl-energy.com/economic-concept/investment-financial-plan/>

Gravity Storage, 2019b. Advantages of Gravity Storage, [verkkosivu]. [viitattu 23.03.2019]. Saatavilla: <https://heindl-energy.com/>

Guney, Mukrimin Sevket & Tepe, Yalcin, 2017. Classification and assessment of energy storage systems, [verkkojulkaisu]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, vol 75, 1187-1197. [viitattu 10.03.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.102>

Huggins Rober A., 2010. Energy Storage, [E-kirja]. [viitattu 12.12.2018]. Springer. E-ISBN 978-1-4419-1024-0. DOI: 10.1007/978-1-4419-1024-0

Hydrostor, 2019. Hydrostor Announces Australia's First Compressed Air Energy Storage Facility, Advances Global Pipeline of Utility-Scale Projects, [verkkojulkaisu]. [viitattu 17.04.2019]. Saatavilla: <https://www.hydrostor.ca/press/Hydrostor-Angas-Project-Press-Release>

Hydrostor, 2018a. Hydrostor Advanced Compressed Air Energy Storage (A-CAES) is a cost effective, fuel-free storage solution that can be sited where needed to deliver hundreds of megawatts (MW) and 4 to 24+ hours of storage, [verkkojulkaisu]. [viitattu 25.03.2019] Saatavilla: https://docs.wixstatic.com/ugd/79b839_b6df1f27a702480cb2195ccea9c4cb05.pdf

Hydrostor, 2018b. Media assets, [verkkosivu]. [viitattu 17.04.2019]. Saatavilla: <https://www.hydrostor.ca/media-assets>

IEA (International Energy Agency), 2019a. Renewables 2018: Market analysis and forecast from 2018 to 2023, [verkkosivu]. [viitattu 15.02.2019]. Saatavilla: <https://www.iea.org/renewables2018/>

IEA (International Energy Agency), 2019b. Energy storage: Tracking Clean Energy Progress, [verkkosivu]. [viitattu 15.02.2019]. Saatavilla: <https://www.iea.org/tcep/energyintegration/energystorage/>

IEA (International Energy Agency), 2019c. What is energy security?, [verkkosivu], [viitattu 18.03.2019]. Saatavilla: <https://www.iea.org/topics/energysecurity/whatisenergysecurity/>

IRENA (International Renewable Energy Agency), 2017. Electricity storage and renewables: Cost and markets to 2030, [E-kirja]. [viitattu 19.12.2018]. Saatavilla: https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf

Jubori, Ayad M. Al & Jawad, Qusay A., 2019. Investigation on performance improvement of small scale compressed-air energy storage system based on efficient radial-inflow expander configuration, [verkkajulkaisu]. Energy Conversion and Management, vol 182, 224-239. [viitattu 12.03.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.12.048>

Jülch, Verena, 2016. Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method, [verkkajulkaisu]. Applied Energy, vol. 183, 1594-1606. [viitattu 21.04.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.165>

Komarnicki, Przemyslaw & Lombardi, Pio & Styczynski, Zbigniew, 2017. Electric Energy Storage Systems: Flexibility Options for Smart Grids, [E-kirja]. [viitattu 17.12.2018] ISBN 978-3-662-53275-1. DOI 10.1007/978-3-662-53275-1

Komarov, I & Rogalev, A. & Rostova, D., 2018. Autonomous Biofuel Power Unit to Provide Thermal and Electrical Energy for Individual Consumers, [verkkojulkaisu]. [viitattu 27.03.2019]. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602712

Lovins, Amory, 2014. Why modern renewable power doesn't need a breakthrough in energy storage | Amory Lovins, [video]. [viitattu 23.03.2018] TED Archive. Saatavilla: <https://www.youtube.com/watch?v=Oo8iEL6SqqI>

Rehman, Shafiqur & Al-Hadhrami, Luai M. & Alam, Md. Mahbud, 2015. Pumped hydro energy storage system: A technological review, [verkkojulkaisu]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44, 586-598. [viitattu 19.12.2018]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.040>

Saidi, Sara & Abdelouahed, Djebli, 2018. Analysis of the effects of materials on the resistance of the flywheel, [verkkojulkaisu]. *Procedia Manufacturing*, vol. 22, 675-682. [viitattu 01.02.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.097>

Sumper, Andreas & Gomis-Bellmunt, Oriol & Díaz-González, Francisco, 2016. Energy Storage in Power Systems, [E-kirja]. [viitattu 10.01.2019]. John Wiley & Sons Ltd. 9781118971291. DOI:10.1002/9781118971291

Tuballa, Maria Lorena & Abundo, Michael Lochinvar, 2016. A review of the development of Smart Grid technologies, [verkkojulkaisu]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, 710-725. [viitattu 14.02.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.011>

Vattenfall, 2019a. Wundefurth Pumped-storage Power Plant, [verkkosivu]. [viitattu 13.03.2019]. Saatavilla: <https://powerplants.vattenfall.com/en/wendefurt>

Vattenfall, 2019b. Goldisthal Pumped-storage Power Plant, [verkkosivu]. [viitattu 13.03.2019]. Saatavilla: <https://powerplants.vattenfall.com/en/goldisthal>

Vattenfall, 2012. Presseinformation [verkkodokumentti]. [viitattu 13.03.2019]. Saatavilla:

https://corporate.vattenfall.de/globalassets/deutschland/presse/datenblatt_psw_wendefurth.pdf

Venkataramani, Gayathri & Ramakrishnan, E. & Sharma, Mangat Ram & Bhaskaran, A. Hari & Dash, Prabir Kumar & Ramalingam, Velraj & Wang, Jihong, 2019. Experimental investigation on small capacity compressed air energy storage towards efficient utilization of renewable sources, [verkkojulkaisu]. *Journal of Energy Storage*, vol. 20, 364-370. [viitattu 14.02.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.10.018>

Wagner Hermann-Josef & Mathur Joytirmay, 2011. Introduction to hydro energy systems, [E-kirja]. [viitattu 12.12.2018]. Springer. ISBN 978-3-642-20709-9. DOI 10.1007/978-3-642-20709-9

Ympäristöministeriö, 2018. Pariisin ilmastopöytäkirja. [verkkosivu]. [viitattu 12.12.2018]. Saatavilla: <http://www.ymparisto.fi/pariisi2015>

Yucekaya, Ahmet, 2015. Energy Storage with Pumped Hydrostorage Systems Under Uncertainty, [verkkojulkaisu]. [viitattu 4.1.2019] Teoksessa Ali Nezihi Bilge, Ayhan Özgür Toy & Mehmet Erdem Günay (toim.) *Energy Systems and Management*. Springer. DOI 10.1007/978-3-319-16024-5

Zakeri, Behnam & Syri, Sanna, 2014. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, [verkkojulkaisu]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, 569-596. [viitattu 15.02.2018]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.011>

Zhang Zh., 2016. Pelton Turbines, [E-kirja]. [viitattu 20.12.2018]. ISBN 978-3-319-31909-4. DOI 10.1007/978-3-319-31909-4.

Zhou, Shengni & Zhang, Jianjun & Song, Wenji & Feng Ziping, 2018. Comparison Analysis of Different Compressed Air Energy Storage Systems, [verkkojulkaisu]. Energy Procedia, vol. 152, 162-167. [viitattu 11.01.2019]. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.09.075>