



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Antti Virtanen

ENERGIAVARASTOINTIMUODOT TUULIVOIMATEKNIKKASSA

Pohjanmaan alueelle soveltuvat

Yksikkö (Tekniikka

2022)

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Antti Virtanen
Opinnäytetyön nimi	Energiavarastointimuodot tuulivoimatekniikassa
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	43 + 3 liitettä
Ohjaaja	Juho Heiska

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Vaasan Ammattikorkeakoulu ja työn ohjasi Juho Heiska.

Tutkimustyön tarkoituksena oli kartoittaa eri tuulivoimatekniikkaan soveltuvia energian varastointimenetelmiä sekä Pohjanmaan alueelle parhaiten soveltuvaa varastointimuotoa. Tarkoituksena oli kehittää (tutkijan omaa) tietämystä energiavarastoista sekä tuottaa esimerkiksi opetuksessa hyödyksi käytettävää materiaalia. Lähdemateriaalina opinnäytetyössä lähteenä käytettiin ainoastaan tiedekirjallisuutta ja artikkeleita, jotka on etsitty luotettavista lähteistä. Lähdemateriaalia analysoitiin ja haettiin samanaikaisesti.

Energiavarastointimenetelmien yleistymisen vihreissä energiamuodoissa on selvä merkki niiden tehokkuudesta energiantuotannossa. Jokaisen varastointimuodon ominaispiirteet vaikuttavat niiden hyödyntämispotentiaaliin kohdekohtaisesti ja lisätutkimusten myötä ne ovat tärkeässä roolissa tulevaisuudessa.

Energiavarastojen hyödyntäminen Pohjanmaan alueella on vielä harvinaista ja vaikka alueelta ei löydy suoraan hyödynnettäviä ominaisuuksia, löytyy silti useita sovelluksia, joiden avulla tuotantoa voidaan tehostaa.

ABSTRACT

Author	Antti Virtanen
Title	Energy storage technologies in wind power systems
Year	2022
Language	Finnish
Pages	43 + 3 Appendices
Name of supervisor	Juho Heiska

This thesis was commissioned by Vaasa University of Applied Sciences and Juho Heiska acted as a supervisor.

The purpose of this thesis was to survey the different kind of energy storage technologies and their suitability to Pohjanmaa region. The purpose was also to develop the writer's knowledge about energy storages and to produce material for educational purposes. The research data was acquired only from science-based literature and articles that originated from trustworthy sources. The source material was analyzed and searched for simultaneously.

The generalization of energy storage systems in renewable energy production is a clear sign of their efficiency. The unique features of each energy storage methods affect their utilization potential in different locations, and they play an important part in the future of energy business.

The utilization of energy storages in Pohjanmaa region are non-existent and the region does not have the certain suitable features there are still numerous energy storage technologies that could be used for more efficient energy production.

Keywords windpower, energystorage, Ostrobothnia

Sisällys

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	5
2.1	Tuuliturbiini.....	7
2.2	Tuulesta energiaa.....	8
3	SOVELTUVUUS POHJANMAAN ALUEELLE	10
4	ENERGIAVARASTOT.....	13
4.1	Pumpattu vesi	14
4.2	Lämpöenergian varastointi	18
4.3	Vauhtipyörä.....	21
4.4	Vetyvarastot.....	23
4.5	Akku	26
4.6	Magneettiset energiavarastot	27
4.7	Paineilmavarastot (CAES).....	29
5.	ENERGIAVARASTON VALINTA	32
6.	TORKKOLAN TUULIPUISTO.....	33
	YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	37

1 JOHDANTO

Alati globaalisti kasvava energiatarve ja sen myötä energiatuotannon aiheuttamien päästöjen lisääntyminen pakottavat energiamarkkinoita muuttumaan ja suosimaan vihreämpiä energiamuotoja. Tuulivoima on ottanut oman paikkansa sähköntuotannossa maailmanlaajuisesti ja tekniikan kehittyessä sekä kustannusten laskiessa siitä on tullut vuosi vuodelta suosittu uusiutuva energiamuoto (Abood & Saiad Ali 2020). Tuulivoiman ongelmana on sen riippuvuus sääolosuhteista, koska energiaa ei voida tuottaa, jos tuulen nopeus on liian alhainen tai ylittää myrskylukemat, jolloin laitteet saattavat vaurioitua (Macías, Martín, & Académico 2014).

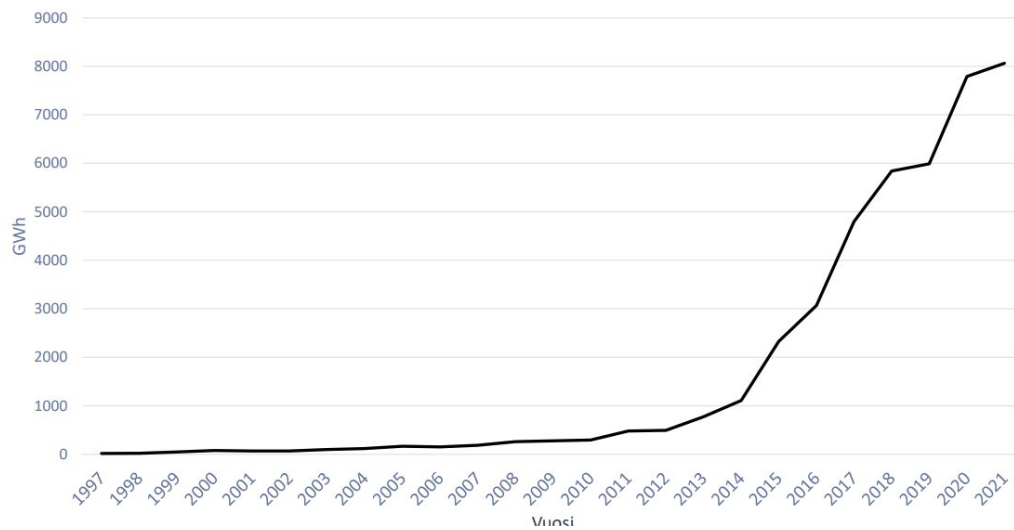
Tehokkaalla energianvarastointimenetelmällä voidaan tuulivoimasta saatua energiaa hyödyntää myös silloin, kun sitä ei kyetä tuottamaan esimerkiksi sääolosuhteiden, vikatilojen tai vuosihuollon aikana. Sähkönkulutuksen ollessa pienempi voidaan ylijäämäenergia ottaa talteen ja hyödyntää kun voimalat ovat poissa käytöstä. Energiaa voidaan varastoida erilaisin menetelmin, joiden hyötysuhteet vaihtelevat (Macías, Martín, & Académico 2014).

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tutkia Pohjanmaan alueelle soveltuvia energian varastointimuotoja maatuulivoimatekniikassa sekä kuinka niitä voitaisiin toteuttaa kustannustehokkaasti. Tavoitteena on pyrkiä tekemään katsaus eri vaihtoehtoihin ja vertailla niiden hyviä ja huonoja ominaisuuksia. Työssä perehdytään olemassa oleviin, tuulivoimassa käytettäviin energian varastointimuotoihin sekä syvennytään Pohjanmaan alueelle maatuulivoimaan parhaiten soveltuvaan tekniikkaan. Aluksi selvitetään tuulienergia yleisellä tasolla ja sen jälkeen energiavarastointimuotoja sekä niiden etuja ja haittoja.

2 TUULIENERGIA

Tuulienergiassa hyödynnettävä tuuli muodostuu, kun auringon epätasaisen lämpösäteilyn aiheuttamat lämpötila- ja ilmanpaine-erot tasaantuvat ilmavirtauksien muodossa. Kun lämpösäteilystä muodostunut lämmin ilma alkaa kohota ylemmäs, sen tilalle virtaa viileämpää ilmaa, joka on tiheydeltään raskaampaa. Ilmanpaineen ja lämpötilan lisäksi tuulen nopeuteen ja suuntaan vaikuttava tärkeä tekijä on maapallon pyörimisnopeudesta johtuva Coriolis-ilmiö (ABB 2011).

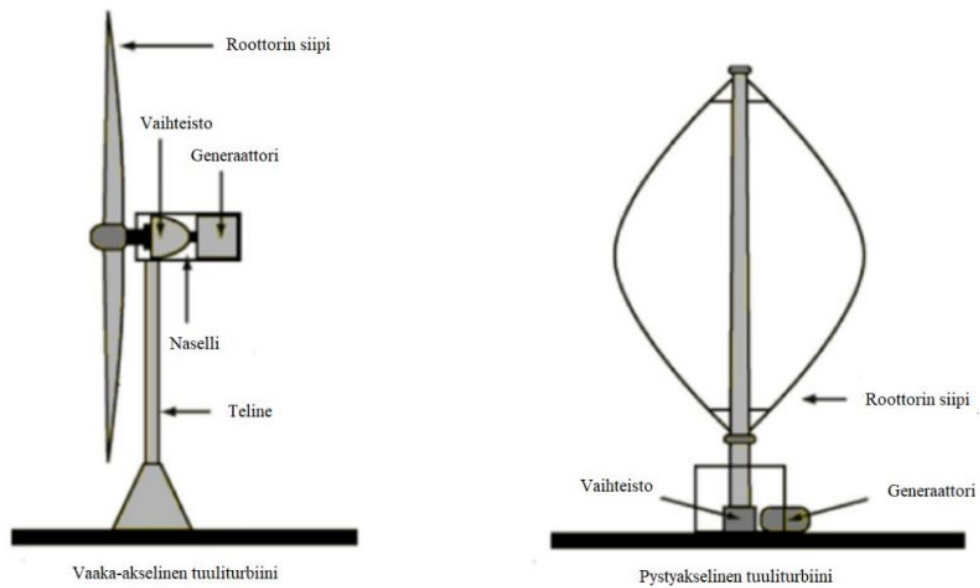
Tuulienergiaa on hyödynnetty purjehduksessa muinaisten kiinalaisten toimesta jo 4000 eaa. Ensimmäisiä tuulimyllyjä on muinaisten kuvien perusteella ollut Kiinassa jo 1800 vuotta sitten. Veden pumppaamiseen tai viljan jauhamiseen käytetyt tuulimyllyt muunsivat tuulienergian liike-energiaksi, kun taas nykyaikaiset tuuliturbiinit muuntavat sen sähköksi. Tuulienergia luokitellaan uusiutuvaksi energiamuodoksi, koska sen tuottamisprosessista ei aiheudu päästöjä ympäristölle, jos ei komponenttien valmistus- ja rakentamispäästöjä ja kuljetuksista tulevia päästöjä oteta huomioon. Kehityksen myötä myös turbiinien materiaalit ovat ottaneet ison harppauksen kohti kestävämpää tulevaisuutta kierrätettävyytensä vuoksi. Tästä syystä tuulivoima on kasvanut suosituimmaksi uusiutuvaksi energiamuodoksi maailmassa. Suomessa tuulivoimatuotanto on kasvanut räjähdysmäisesti viimeisen kymmenen vuoden aikana (ABB 2011). (Kuva 1.)



Kuva 1: Vuoden 2021 tilasto tuulivoimatuotannosta Suomessa. (Tuulivoimayhdistys 2021)

2.1 Tuuliturbiini

Tuuliturbiini muodostuu yleisesti tornista, konehuoneesta eli nasellista ja roottorista (Kuva 2.). Tornin on yleensä putki- tai ristikkorakenteinen ja on pystytetty turbiinin perustusten päälle ja kannattelee koko turbiinia. Naselli on tornin huipulla sijaitseva tila, jonne on sijoitettu vaihteisto, generaattori sekä ohjaus- ja säätöjärjestelmät. Roottori on naselliin kiinnitetty kokonaisuus, joka koostuu navasta sekä pyörivistä lavoista. Lapojen rakenne on ratkaiseva tekijä tuulivoimalan energian tuotossa, sillä niihin kohdistuvan ilmvirran avulla energiantuotanto mahdollistetaan. Yleisin tuuliturbiinityyppi on kolmilapainen, vaaka-akselinen turbiini, jonka hyötysuhde isommassa mittakaavassa on todettu tehokkaammaksi vaihtoehdoksi verrattuna horisontaaliseen tuuliturbiiniin. Pysty akselisten turbiinien lavat eivät kata yhtä suurta pinta-alaa, joten keskinopeilla tuulilla vaaka-akseliset turbiinit tuottavat sähköenergiaa paremmalla tehokertoimella.



Kuva 2. Esimerkki vaaka-akselisesta sekä pystyakselisesta tuuliturbiinista. (Nuutinen et al. 2020)

Turbiinien koko on kasvanut vuosi vuodelta niin energiantuoton kuin fyysisen koon puolesta suuremmaksi. Yhä käytössä olevat maatuulivoimalat ovat tyypillisimmin 1–3 megawatin kokoluokkaa, mutta tällä hetkellä suurimmat tuulivoimalat alkavat lähestyä jopa kymmentä megawattia. Tuotantotehon kasvuun vaikuttaa merkittävästi tuulivoimalan korkeus sekä roottorin halkaisija. Isomman kokoluokan tuulivoimalan torni voi olla 180 m korkea ja roottorin halkaisija jopa 150 m (Suomen tuulivoimayhdistys 2019).

2.2 Tuulesta energiaa

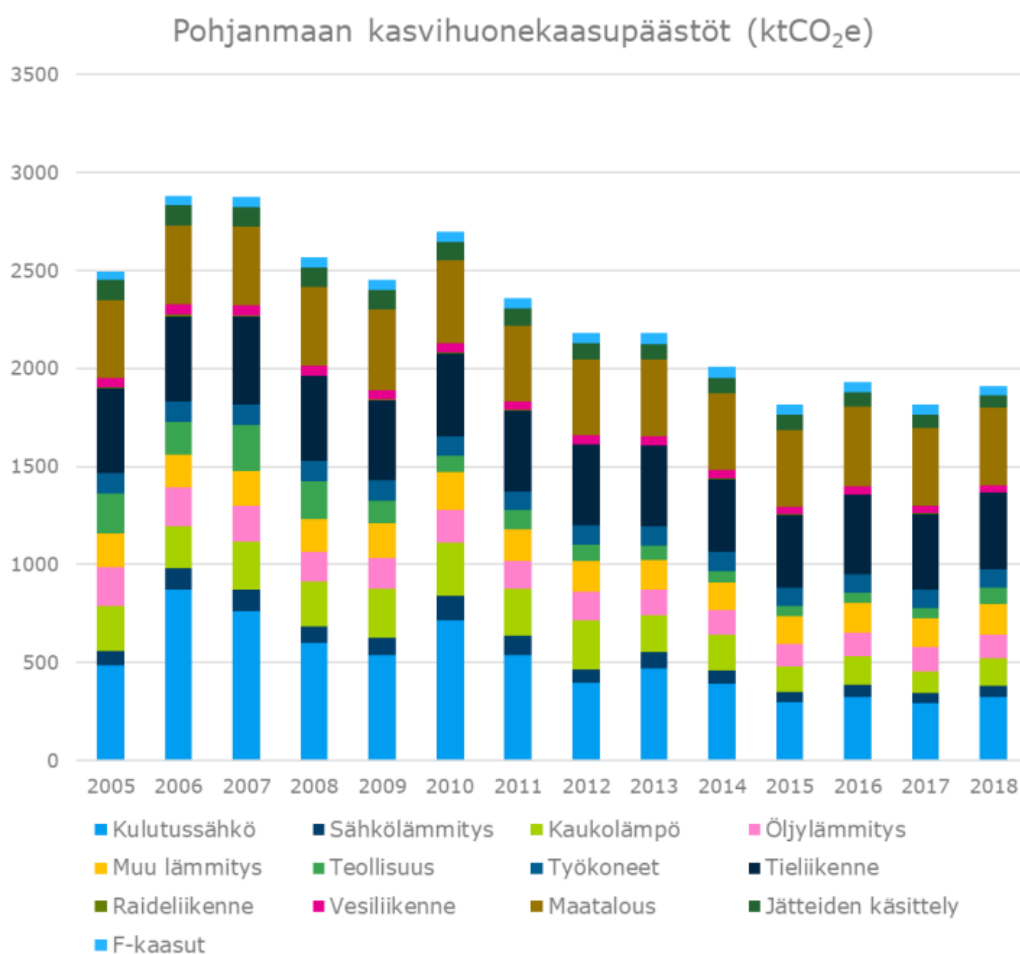
Tuuliturbiini kykenee muuntamaan tuulesta saadun liike-energian sähköenergiaksi generaattorin avulla, mutta liike-energiaa pystytään hyödyntämään lapojen muodon ja oikean kulman ansiosta. Tuulivoimalan lavat ovat muodoltaan kärjestä katsottuna pisaramaiset ja muistuttavat hieman lentokoneen siipiä. Muotoilun ansiosta tuulen suuntaan käännetyn nasellin lapojen yläpuolelle muodostuu imuvoimia ja alapuolelle nostovoimia. Tätä ilmiötä kutsutaan nosteksi, jota

tuuliturbiini hyödyntää saadakseen lavat pyörimään. Yleisesti tuuliturbiini tarvitsee n. 3–5 m/s tuulen nopeuden käynnistyäkseen, nimelliskapasiteetti saavutetaan 12–14 m/s tuuliolosuhteissa ja 25 m/s ylittävissä tuulen nopeuksissa turbiini pysäytetään, koska lapojen pyörimisnopeus kasvaisi niin suureksi, että laitevaurioiden riski lisääntyy (ABB 2011).

Tuulipuistoissa useiden voimaloiden sijoittaminen samalle alueelle tulee suunnitella tarkasti, koska liian tiheään pystytetyt voimalat heikentävät muodostuvilla ilman pyörteillä voimaloiden tuotantotehoa. Turbiinien ohjausjärjestelmä pitää huolen, että voimalat ovat tuulen suuntaan nähden optimaalisessa kulmassa ja että pyörimisnopeus on vallitseviin olosuhteisiin sopiva.

3 SOVELTUVUUS POHJANMAAN ALUEELLE

Pohjanmaa koostuu 14 kunnasta, asukkaita alueella on n. 176 000 ja maakunnan keskus on 67 000 asukkaan Vaasa. Alueen suurimmat päästöt muodostuvat maataloudesta, kulutussähköstä, lämmityksestä sekä tieliikenteestä (Rauhala 2021) (Kuva 3.).

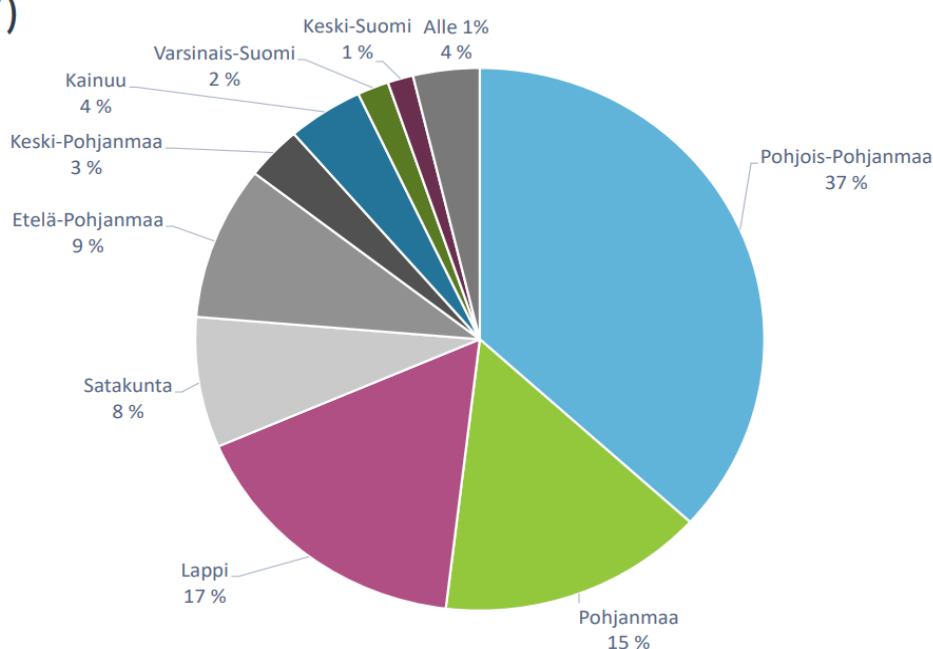


Kuva 3. Pohjanmaan alueen päästöt vuosina 2005–2018. (Rauhala 2021)

Suomessa on yhteensä 962 tuulivoimalaa, joiden yhteenlaskettu teho on noin 3 257 MW. Tuulivoimatuotanto on keskittynyt länsirannikolle ja tulevia hankkeita tarkasteltaessa suunta näyttää pysyvän samana. Pohjanmaalla sijaitsee 36

tuulivoimatuotantoon potentiaalista aluetta, joiden yhteispinta-ala on n. 2 500 km². Suomen Tuulivoimayhdistyksen mukaan Pohjanmaa kattaa kumulatiivisesta tuotantokapasiteetista n. 15 (Suomen Tuulivoimayhdistys 2021) (Kuva 4.). Pohjanmaa on siis keskeinen alue Suomen tuulivoimatuotannon kasvattamiseen ja mahdollistamaan hallituksen vuonna 2019 asettamaa ”Hiilineutraali Suomi” tavoitetta, jonka on määrä toteutua vuoteen 2035 mennessä.

Kumulatiivinen tuotantokapasiteetti maakunnittain (MW)



Kuva 4. Tuulivoiman kumulatiivinen tuotantokapasiteetti Suomessa. (Tuulivoimayhdistys 2021)

Alueena Pohjanmaa on niin maa- kuin merituulivoimatuotannollekin erinomainen. Merellinen sijainti ja isot laakeat alueet soveltuvat tuuliolosuhteiden puolesta tarkoitukseen hyvin. Myös Vaasan alueella sijaitseva energiaklusteri, jonka tavoitteena on kehittää kestäviä teknologiaratkaisuja energiateollisuuden, kieliseudun asenteesta ja valmiudesta tuottaa kestävä energiaa.

Etelä-Pohjanmaan ja Pohjanmaan maakuntien ja alueiden mahdollisuuksista siirtyä päästöttömään energiatuotantoon vuoteen 2050 mennessä on hyvä esimerkki alueiden valmiudesta ja halusta hyödyntää alueen koko potentiaalia (Rauhala 2021).

4 ENERGIAVARASTOT

Kun tuulienergiaa ei sääolosuhteiden tai huoltotoimenpiteiden vuoksi voida tuottaa, energiavarastojen merkitys kasvaa. Myös hetkellisesti noussut piikki energian tarpeessa voi olla syynä energiavarastojen käyttöön, jos tuulivoimaa ei kyetä tuottamaan tarpeeksi. Myös käyttösähkön hintaa kyetään tasaamaan aktiivisen energiavarastoinnin avulla, koska uusiutuvien energiamuotojen vallatessa vuosi vuodelta yhä isompaa osaa kokonaisenergiantuotannosta, myös hintojen heilahtelu kasvaa. Sähkön hintojen heilahtelu näkyy eritoten Suomen kaltaisessa maassa, jossa sääolosuhteet vaihtelevat paljon (Alanen et al. 2003).

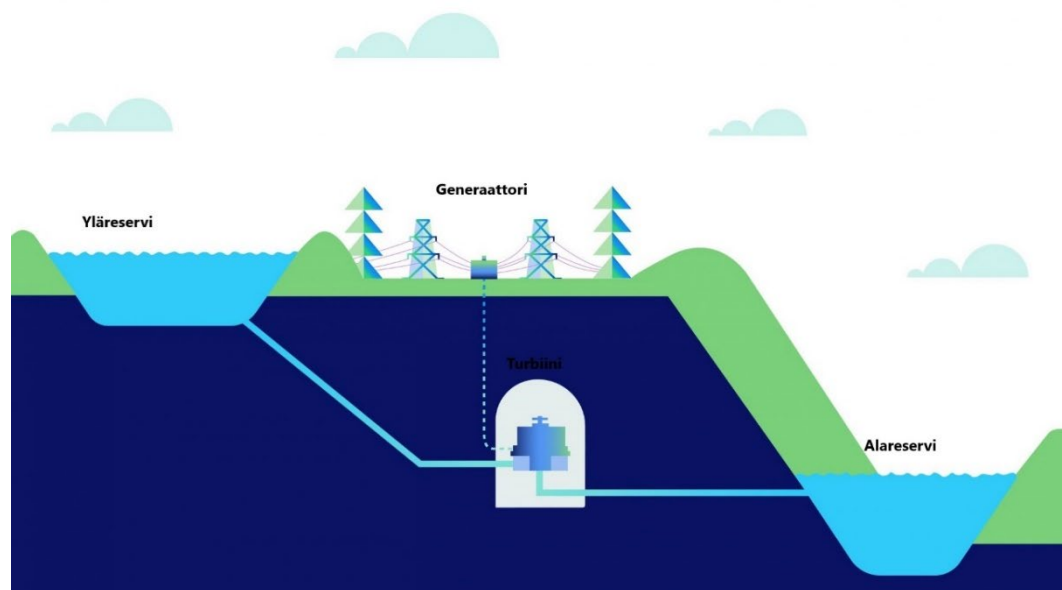
Sähköverkon peruseriaate on, että sähköä tuotetaan juuri niin paljon kuin sitä kulutetaan. Perinteisillä energian tuotantomuodoilla tuotantoa on ollut helpompi säätää kulutuksen mukaan, mutta uusiutuviissa energiamuodoissa tuotannon säätäminen on hankalampaa ja siksi häiriöiden riskit sähköverkossa kasvavat. Kulutusta ja tuotantoa on pyritty tasaamaan myös varavoimaa, kuten vesivoimaa käyttämällä. Tuuli- ja vesivoimaa on käytetty yhdessä jo vuosia vesivoiman luotettavuuden vuoksi. Optimaalisissa tuuliolosuhteissa vesivoiman tuotantoa on vähennetty ja tynnellä kelillä, kun tuulivoimaa ei kyetä tuottamaan tehokkaasti, vesivoiman tuotantoa on lisätty ja näin energian tuotantoa on pystytty säätämään kysynnän mukaiseksi (Peljo 2021). Tuulipuistoja joudutaan myös tietyllä tavalla ylirajoittamaan suhteessa tuotantoon nähden, jotta sähkönmyynnin tavoitteet kohdattaisiin. Energiavarastojen käytöllä kustannukset pitkässä juoksussa putoaisivat.

Noin 30 % maailman energian tuotannosta koostuu uusiutuvasta energiasta (IEA, Global Energy Review 2021) ja tästä noin puolet on vesivoimaa. Kuitenkin aurinko- ja tuulivoiman osuus kasvaa jatkuvasti ja on jo saavuttamassa vesivoimatuotannon. Tästä syystä uusiutuvan varavoiman käyttäminen tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseen vaikeutuu vuosi vuodelta. Kyseinen ongelma voitaisiin ratkaista energian varastoinnilla.

4.1 Pumpattu vesi

Tällä hetkellä vielä maailman yleisin ja suurikapasiteettisin sähkön varastointimuoto on pumppuvoima. Sitä on käytetty jo 1890-luvulta asti sen luotettavuuden sekä pienten energiahäviöiden vuoksi. Pumppuvoimala on oivallinen ratkaisu tasaamaan energian kulutuksen ja tuotannon välistä erotusta.

Toimintaperiaatteeltaan ja rakenteeltaan pumppuvoimala on yksinkertainen energiavarasto. Kaksi vedellä täyteen pumpattua, eri korkeuserot omaavaa allasta, joiden välistä potentiaalienergiaa hyödynnetään. Energiaa varastoidessa alempana olevasta altaasta pumpataan vettä ylös säilöön ja energiavarastoa purettaessa ylhäällä oleva vesi lasketaan turbiinille, jolloin se muutetaan takaisin sähköenergiaksi. (Kuva 5.)



Kuva 5. Pumppuvoimalan toimintaperiaate.

Kuvassa ylijäämäenergia käytetään veden pumppaamiseen alhaalla olevasta altaasta ylempään. Kun energian tarve verkossa kasvaa, vesi lasketaan yläaltaasta turbiinille, joka on yhdistetty generaattoriin. Generaattori syöttää saadun energian verkkoon.

Jotta toimintaedellytykset täyttyisivät, tulee altaiden välinen korkeusero olla huomattava. Tämän takia pumppuvoimalan rakentaminen vaatii valtavia maarakennustöitä, jos ympäristö ei ole siihen luonnostaan sopiva. Jokia, rakenteeltaan sopivia vesistöjä tai patoaltaita voidaan hyödyntää pumppuvoimalaitoksen rakentamisessa. Pumppuvoimalaitoksen vaikutuksista ympäristöön on ollut kiistaa jo vuosia ja sen vuoksi uusien voimaloiden rakentaminen on hidastunut. Myös suljetun piirin voimalaitoksia, jossa ei hyödynnetä luonnon vesistöjä, on mahdollista rakentaa. Kyseisissä voimaloissa altaiden välillä liikkuva vesi pysyy koko ajan suljetussa järjestelmässä, jolloin ympäristövaikutukset ovat pienemmät.

Pumppuvoimalaitoksen kapasiteetin yksi merkittävimmistä tekijöistä on altaiden välinen korkeusero. Mitä suurempi korkeusero voimalaitoksessa on, sen suurempi voimalan energiavarastointikapasiteetti on. Nykyaikaisten pumppuvoimaloiden generaattorien kehityksen myötä energian varastoinnin hyötysuhde voi olla jopa yli 80 % ja siksi ne ovat niin merkittävässä asemassa energijärjestelmien varavoimana (Alanen et al. 2003).

Pumppuvoimalaitoksen teho saadaan kaavasta 1.

$$P = \eta \rho V h g \quad 1$$

P = laitoksen teho (W)

η = turbiinin hyötysuhde (%)

ρ = veden ominaistiheys ($\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$)

V = tilavuusvirta turbiinissa ($\frac{m^3}{s}$)

h = vesialtaiden korkeusero (m)

g = putoamiskiihtyvyys ($\frac{m}{s^2}$).

Varastoitu energian määrä saadaan kaavasta 2.

$$E = mgh$$

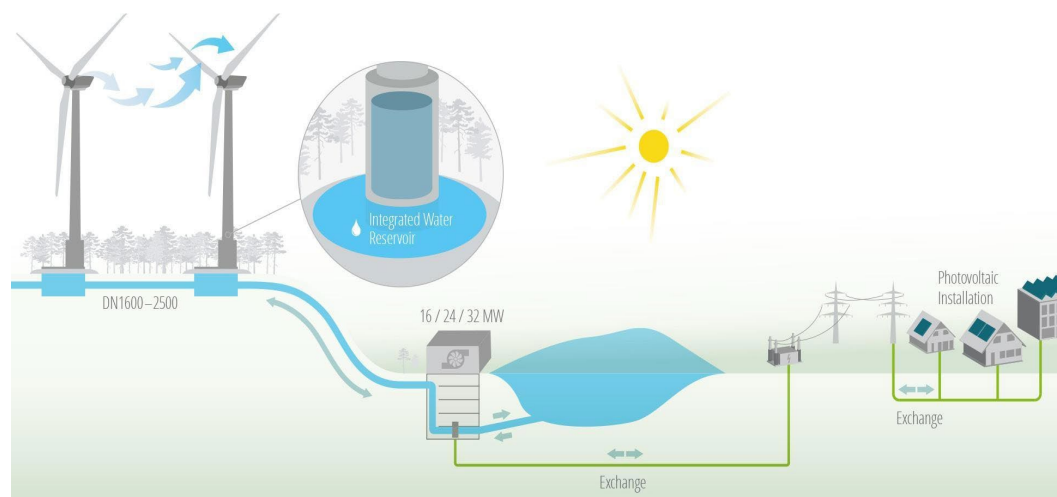
2

m = massa (kg)

g = putoamiskiihtyvyys ($\frac{m}{s^2}$)

h = matka (m).

Alun perin vesivoimaa ja pumppuvoimaloita rakennettiin varavoimaksi ydin ja hiilivoimalle, mutta uusiutuvien energiamuotojen yleistyessä vuosi vuodelta enemmän, on energiavarastoja hyödynnetty myös niiden tehostamiseen. Gaildorfissa, Saksassa sijaitsee tuulipuisto, jossa on käytössä yksi tämän hetken korkeimmista voimaloista (Kuva 6.). Puistossa on myös hyödynnetty tuulivoimaloiden perusteita rakentaessa maan korkeuseroja kaivamalla n. 40 000 m³ vesitankki jokaisen voimalan alle. Voimalat ovat korkeammalla kuin alava maasto, johon isompi vesisäiliö on sijoitettu ja pumppujen ja generaattorien avulla vesivoimaa voidaan käyttää energiavarastona. Väliaikaisen vesivaraston kokonaisnimellisteho on n. 16 MW (Francesco 2019).



Kuva 6. Pumppuvoimalla tehostettu tuulipuisto Saksassa.

4.2 Lämpöenergian varastointi

Lisääntyneiden energian varastointitarpeiden myötä myös lämpöenergian varastoimiseen käytettävät materiaalit ja johdinaineet ovat kehittyneet. Lämpöenergian varastointi on ollut käytössä eri muodoissa jo aikojen alusta saakka.

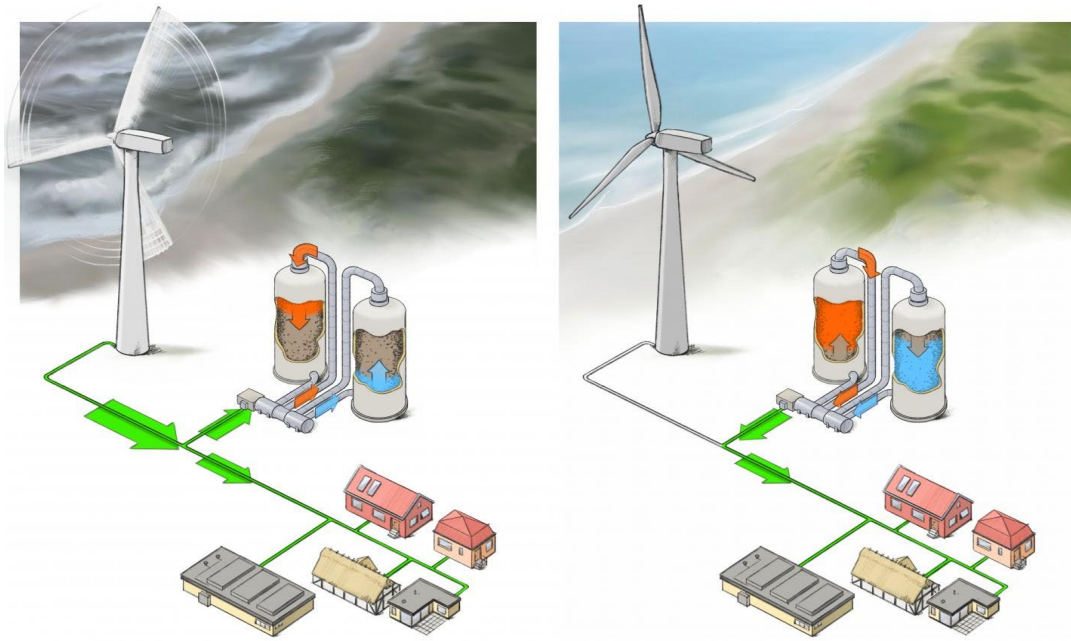
Lämpöenergiaa voidaan hyödyntää sekä kylmää, että lämmintä ilmaa käyttämällä. Energian varastointimateriaalia joko viilennetään tai lämmitetään käyttökohteesta riippuen ja varastoitu energia voidaan myöhemmin hyödyntää joko sähköenergiana tai käyttämällä lämmitykseen tai viilennykseen. Lämpöenergian varastoinnin avulla voidaan mm. vähentää päästöjä, lisätä käyttöjärjestelmän luotettavuutta ja nostaa kokonaishyötysuhdetta. Lämmön varastointimenetelmiä on erityyppisiä ja sopivan menetelmän valinnassa tulee kiinnittää huomiota saatavilla olevan tehon määrään, varastointiaikaan, käyttöikänsä vaadittavan varaston kokonaiskapasiteettiin sekä haluttuun hyötysuhteeseen. Oikein valittu lämmön varastointimenetelmä lisää tuntuvasti energijärjestelmän joustavuutta kysynnän vaihdellessa ja tätä kautta kasvattaa hyötysuhdetta.

Yleisin lämmön varastointityyppi on tuntuvan lämmön varastointi, joka perustuu lämpötilaeron vaihteluun. Varastoidun lämmön määrä on riippuvainen varastointiaineen tiheydestä, määrästä sekä lämmönvaihtelusta lämpövarastossa. Varastointimateriaalin tulee olla ominaislämpökapasiteetiltaan korkea, lämmönjohtavuudeltaan hyvä, helppo ja edullinen valmistaa sekä kemiallisilta ominaisuuksiltaan vakaa. Tästä syystä yleisin käytetty varastointimateriaali tuntuvan lämmön varastoimisessa on vesi, koska se on edullinen ja varaa lämpöä tehokkaasti. Lämpöä voidaan varastoida myös maaperään kuten kallioon tai hiekkaan. Myös ominaisuuksiltaan sopivia rakenteita, kuten rakennusten seiniä tai vaikka tulisijojen rakenteita voidaan myös hyödyntää tuntuvan lämmön varastointiin (Li 2016).

Lämmön varastoinnissa voidaan käyttää myös latentin lämpöenergian varastoimista, joka perustuu energiavarastossa käytetyn aineen faasimuutokseen, sekä termokemiallisen lämmön varastointia, jonka toiminta perustuu reversiibeihin kemiallisiin reaktioihin.

Mitä suurempi lämpövarasto on kyseessä, sitä vähemmän lämpöhäviötä tapahtuu ja suuremmissa lämpövarastoissa varastointiaika voi olla jopa vuosia. Tuulivoimatekniikassa lämpöenergian käyttämistä energiavarastona on toteutettu jo useissa kohteissa. Esimerkiksi Saksassa, Nechlinin kylässä, jossa pieni osa lähistöllä sijaitsevasta tuulipuistosta optimaalisissa olosuhteissa tuotetusta energiasta käytetään lämmittämään lämpövarastoa. Halkaisijaltaan n.18 m kokoinen ja tilavuudeltaan miljoona litraa vettä vetävä energiasäiliö lämmitetään 98 asteiseksi ja lämpöenergiaa hyödynnetään kaukolämmön tavoin kylän asuntojen lämmitykseen. Järjestelmä vastaa noin 35:ttä, arviolta 720 000 kWh käyttävän, asunnon lämmitystarpeesta ja verrattaessa sitä vastaavaan öljykäyttöiseen järjestelmään se säästää ympäristöä n. 20 tonnin hiilidioksidipäästöiltä (Nechlin, Wind powered water heater 2022).

Tanskassa tulivoimalla toimiva 10 MW lämpöenergiavarasto on rakenteilla ja sen on määrä valmistua tänä vuonna. GridScale-teknologia perustuu pieniin kiviin varastoituun lämpöön. Kivet voidaan lämmittää jopa 600°C lämpötilaan. Se on edullinen vaihtoehto perinteisemmille lämpövarastoille, koska sen hinta on arvioitu olevan 10 €/kWh, kun yleisesti veteen perustuvien lämpövarastojen hinta on n. 20 €/kWh. Kuvassa 7 Tanskaan rakennettavan energiavaraston luonnos (Aarhus University 2021).



Kuva 7. Tuulivoimalla toimiva 10 MW lämpöenergiavaraisto, Tanskassa (Aarhus University 2021).

4.3 Vauhtipyörä

Vauhtipyörä varastoi sähköenergiaa liike-energiaksi. Sähkömoottorin avulla vauhtipyörän pyörimisnopeutta nostetaan, kun energiaa halutaan varastoida. Energiaa purettaessa liike-energia muutetaan takaisin sähköenergiaksi generaattorin avulla.

Varastointikapasiteetti on vauhtipyörässä riippuvainen pyörimisnopeudesta, järjestelmän koosta, materiaalin ominaisuuksista sekä pyörän muodosta. Myös esimerkiksi laakereiden merkitys vauhtipyörän toiminnassa on merkittävä. Uusissa malleissa magneettisten laakereiden käyttö on yleistynyt ja sen ansiosta kitka pienenee ja hyötysuhdetta voidaan parantaa. Vauhtipyörässä pyörimisnopeus on merkittävä tekijä, koska liike-energiaan sitoutuneen energian määrä on pyörimisnopeuden neliö (Przemyslaw Komarnicki et al. 2017, s.136–140.) Materiaalina perinteisissä vauhtipyörissä on yleensä käytössä teräs, mutta moderneimmissa laitteissa on käytössä hiilikuitu tai muut vastaavat, kevyemmät materiaalit. Kevyempi rakenne ja paremmat laakerit lisäävät valmistuskustannuksia, mutta hyötysuhde paranee, koska pyörimisnopeutta voidaan kasvattaa. Vauhtipyörän rakenteisiin lukeutuu myös jäähdytysjärjestelmä, joka pitää huolen, ettei kitkasta aiheutuva lämpö nosta laitteen kokonaislämpötilaa liian korkeaksi. (Wicki & Hansen 2017)

Vauhtipyörä ei ole hyvä energiavarasto pitkäaikaiseen energian säilytykseen tehohäviöiden vuoksi, mutta lyhytaikaisessa varastoinnissa se toimii hyvin. Sen latauskapasiteetti ei huonone samalla tahdilla kuin esimerkiksi akuissa, joten sijoituksena se on pitkäaikainen.

Vauhtipyörän hyötysuhde voidaan laskea kaavasta 3.

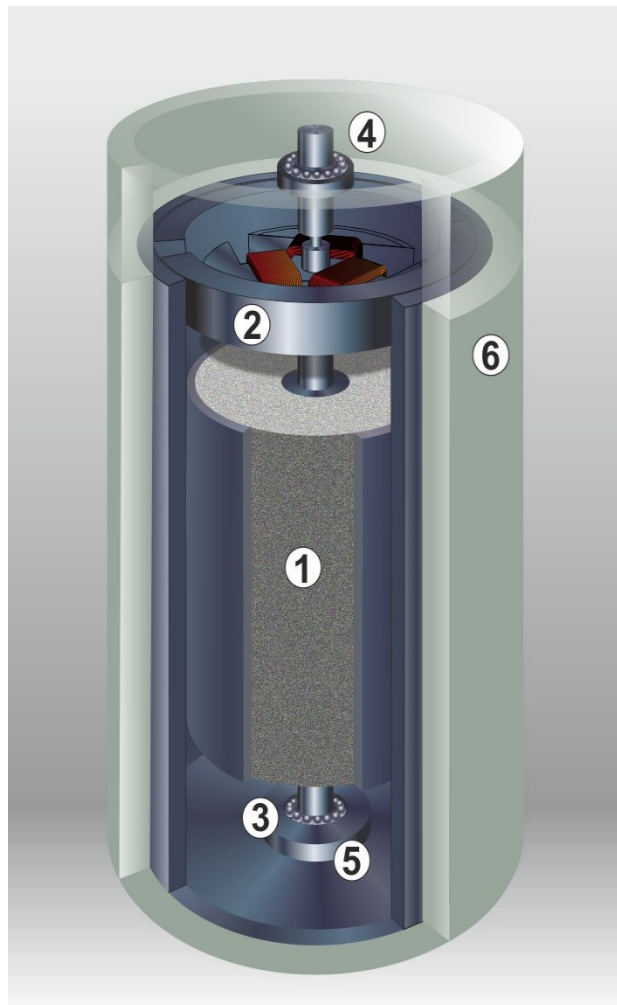
$$E = \frac{1}{2} I \omega^2$$

3

I (Kg \times m²) on inertiamomentti

ω (rad/s) kulmanopeus.

Kuvassa 8 on kuvattu vauhtipyörän rakenne poikkileikkauksena.

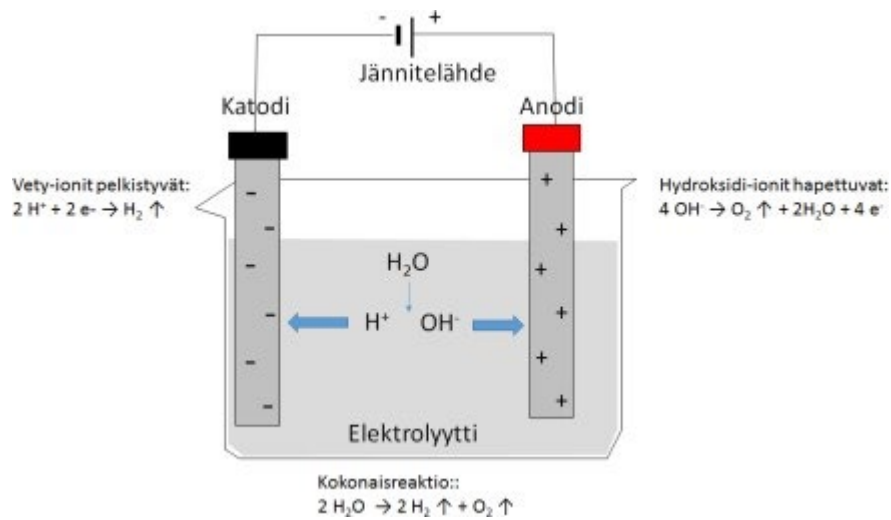


Kuva 8. Vauhtipyörän rakenne 1. Vauhtipyörän betoni sylinteri 2. Vaihtovirta generaattori 3 ja 4. Ala- ja yläpallolaakerit 5. Magneettiset painelaakerit 6. Suljettu kotelointi.

4.4 Vetyvarastot

Vety on niin kutsuttu synteettinen polttoaine, jonka suosio on myös kasvanut viime vuosina. Se on hyvämaineinen vaihtoehtoinen polttoaine, mutta toisin kuin hiili, kaasu tai öljy se ei ole primäärinen energianlähde. Sitä pidetään toissijaisena energian kantajana, koska vety on lähestulkoon aina sitoutunut johonkin toiseen aineeseen ja siksi vedyn valmistamisprosessi vaatii energiaa. Valmistusprosessin jälkeen vety voidaan varastoida polttoaineena ja käyttää erilaisissa energian valmistusprosesseissa, lämmöntuotannossa tai vaikka polttoaineena erityyppisissä moottoreissa tai polttokennoissa. Se on hiilivapaa polttoaine, koska palaessaan se vapauttaa reaktiossa vain vesihöyryä ja siksi sen suosio polttoaineena on ollut kasvussa. (Edwards, Kuznetsov & David 2007)

Niin kauan kuin vedyn erottamisprosessissa käytetään muita kuin fossiilisia polttoaineita, se on aidosti uusiutuvaan energiaan perustuvaa polttoainetta ja prosessi pysyy hiilineutraalina. Tuulivoimatekniikan tukena vedyn energiavarastointi toteutetaan erottamalla se vedestä elektrolyysin avulla. Prosessin jälkeen vety voidaan säilöä nesteytettynä, paineistettuna kaasuna tai hybridinä. Koska vety muuttaa olomuotoaan kaasusta nesteeksi vasta saavutettuaan $-252,87\text{ C}^{\circ}$, on sen säilöminen sekä kalliimpaa että vaikeampaa toteuttaa. Nestemäisessä muodossa säilöminen lisää myös energiahäviöitä, joten yleisimmin vety säilötään kaasuksi puristettuna. Vety paineistettuna kaasuna on kuitenkin energiatiheydeltään suhteellisen heikko tilavuuteensa nähden, joten isommat energiavarastot vaativat paljon tilaa ja monesti maanalaisia, tyhjäksi jääneitä kaivoksia tai vastaavia voidaan hyödyntää (Alanen et al., 2003 s.45-46). Vety vaatii myös säiliön eristyksiltä enemmän kuin vaikka maakaasu, koska sen diffuusiokyky on korkeampi (Edwards, Kuznetsov & David 2007). Kuvassa 9 nähdään elektrolyysin perusperiaate.



Kuva 9. Elektrolyysireaktio.

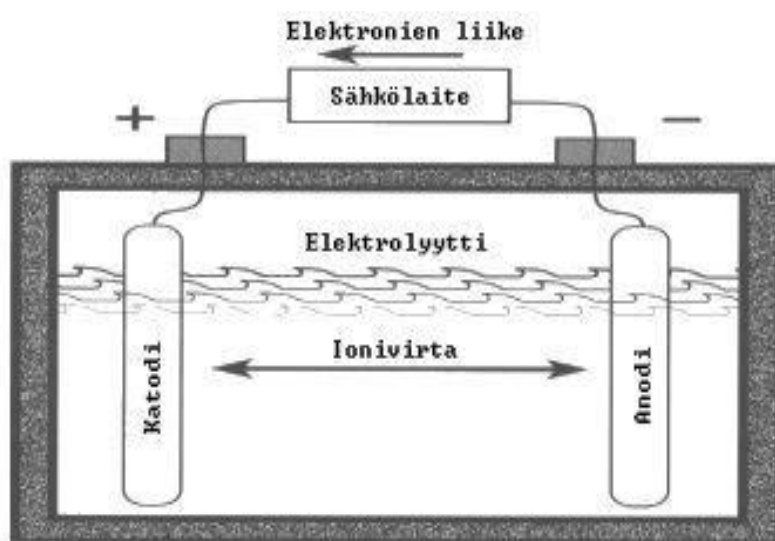
Hareniin, Saksaan on määrä valmistua vuoden 2022 kesällä vetytoiminen energiavarasto, jonka avulla Harenin kylä tulisi olemaan täysin omavarainen sähköntuotannon suhteen hyödyntämällä ainoastaan vihreää energiaa. Vedyn energiavarasto tullaan liittämään yhteisön Fehndorf-Lindlohissa sijaitsevaan 16 tuulivoimalan puistoon. Järjestelmään tullaan rakentamaan myös akkutoiminen varasto, vetytankkauspiste sekä kaasuverkosto, jonka avulla vetyä voidaan hyödyntää myös muun muassa lämmityksessä ja maataloudessa (Jones 2022). Kuvassa 10 on H2-Hubin suunnitelma.



Kuva 10: H2-Hub-vetyenergiavarasto (Jones 2022)

4.5 Akku

Energiavarastoista puhuttaessa tulee ensimmäisenä mieleen akku. Akku on kemiallinen energiavarasto, jonka toiminta perustuu hapettumis- ja pelkistymisreaktioon. Akussa sijaitsevissa useissa kennoissa on hapetin, pelkistin sekä kaksi elektrodia upotettuna väliaineeseen eli elektrolyyttinesteeseen, joka mahdollistaa ionien siirtymisen elektrodien välillä. Kuvassa 11 havainnollistetaan akun toimintaperiaate.



Kuva 11. Akun kennon sisällä tapahtuva reaktio.

Kun akun lataus purkautuu, hapettumisen yhteydessä anodilta vapautuu elektrodeja, jotka hakeutuvat ulkoisen piirin kautta positiivisesti varautuneelle katodille muodostaen sähkövirran. Akkua ladattaessa reaktio toimii päinvastaisella tavalla. Erilaiset elektrodiaineet ja elektrolyyttinesteet määrittävät sen millaiset ominaisuudet akulla on. Akun varastointikapasiteettiin vaikuttaa gravimetrinen kapasiteetti, joka kuvastaa kapasiteettia akun massayksikköä kohti. (Jongerden & Haverkort 2008).

Erityyppisiä akkuja on useita ja useimmiten niiden nimestä voi päätellä, mitä materiaaleja elektrodeissa on käytetty tai millainen toimintaperiaate akussa on. Akun valinta tulee tehdä käyttökohteen mukaan, koska erityyppisillä akuilla on erilaiset ominaisuudet käyttöönsä, tehon ja kapasiteetin puolesta. Alla listattuna yleisempiä akkutyyppisiä.

Taulukko 1. Eri akkutyyppisiä ja niiden ominaisuuksia.

Akkutyyppi	Anodi	Katodi	Energia tiheys Wh/kg	Energia tiheys Wh/l
Lyijy	Pb	PbO ²	35	70
Nikkeli-kadmium	Cd	Ni-oksidi	35	80
Nikkeli-metallihydridi	(MH)	Ni-oksidi	50	175
Litium-ioni	Cd	Li(x) CoO ₂	90	200
Sinkki-ilma	Zn	O ₂	150	160

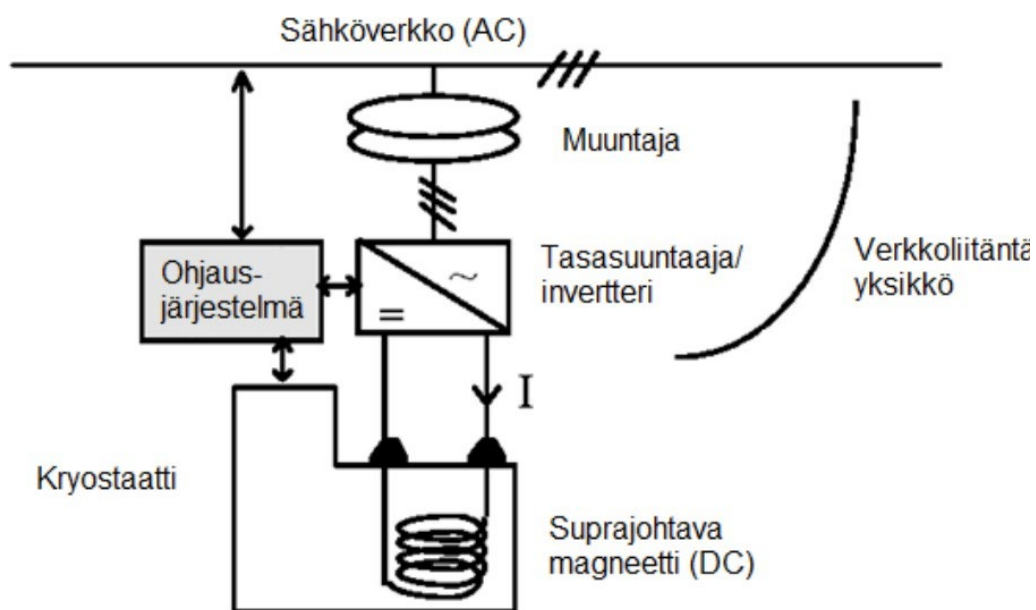
Akkukäyttöiset energiavarastot voivat olla kokoluokaltaan yhdestä pienestä akkukaapista kymmenien sarjaan kytkettyjen akkukonttien kokonaisuuksiin, joiden teholuokat yltyvät useisiin megawatteihin (Bhatt et al. 2016).

4.6 Magneettiset energiavarastot

SMES on suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto, jonka toiminta perustuu käytetyn materiaalin viilentämiseen todella matalaan lämpötilaan, jolloin se muuttuu suprajohtavaksi. Tällöin materiaalin resistiivisyys katoaa ja virtaa voidaan kierrättää piirissä lähes olemattomin energiahäviöin. Energia varastoituu virran luomaan magneettikenttään ja tästä piiristä se voidaan haluttaessa purkaa käytössä olevaan verkkoon. Ensimmäiset sovellukset

suprajohteista eivät olleet kustannustehokkaita äärimmäisen matalan käyttölämpötilan vuoksi, mutta korkeampien lämpötilojen suprajohteiden (HTS, High Temperature Superconductor) löytyessä käyttö yleistyi merkittävästi. SMES-järjestelmät ovat teholuokiltaan melko suuria (n. 10–100 MW), mutta myös pienempiä sovelluksia kehitetään tekniikan ja materiaalien kehittyessä (Alanen et al. 2003).

Kuvassa 13 kuvataan SMES-järjestelmän komponentteja. Siihen sisältyy muuntaja, konvertteri, suprajohtava magneetti sekä jäähdytysjärjestelmä eli kyrostaatti. AC-verkosta otettava sähkövirta muunnetaan DC-virraksi ja ohjataan suprajohtavalle käämille. Käämin resistanssi on hyvin alhainen matalan lämpötilansa ansiosta. SMES-järjestelmällä on lyhyt vasteaika, suuri virtatiheys ja korkea hyötysuhde (90–95 %) (Liquip Team 2021).



Kuva 13. SMES- järjestelmän komponentit.

Järjestelmään varastoitunut maksimienergia saadaan kaavasta, jossa $L(H)$ on magneettikäämin induktanssi:

$$E_{max} = \frac{1}{2} L_s I_r^2$$

Teho lasketaan kaavalla:

$$P = UI = L_s \frac{dI}{dt} I = U_{max} \sqrt{Q_{max}} \frac{2}{L_s}$$

$$[W] = [V][A] = [H] \frac{d[A]}{d[s]} [A] =$$

SMES on energiavarastona luotettava ja pitkäikäinen, mutta se ei sovellu pitkiin varastointiaikoihin hyvin, vaan on parhaimmillaan tasoittamaan lyhyitä energiakatkoksia sähköjatelussa tai tuotannossa tunti- tai vuorokausitasolla. Siitä ei muodostu ympäristölle haittoja voimakasta magneettikenttää lukuun ottamatta. SMES-laitteisto on monesti liikuteltava, erillinen yksikkö, jonka sijoittamisessa voimakas magneettikenttä tulee ottaa huomioon, koska se voi vaurioittaa muita sähkölaitteita. Vaikkakin se on ominaisuuksiltaan hyvä energiavarasto, se häviää kilpailijoilleen hinnassa, joka nousee korkeaksi kalliiden materiaalien sekä jäähdytysjärjestelmän aiheuttavien, korkeiden ylläpitokustannusten myötä (Alanen et al. 2003).

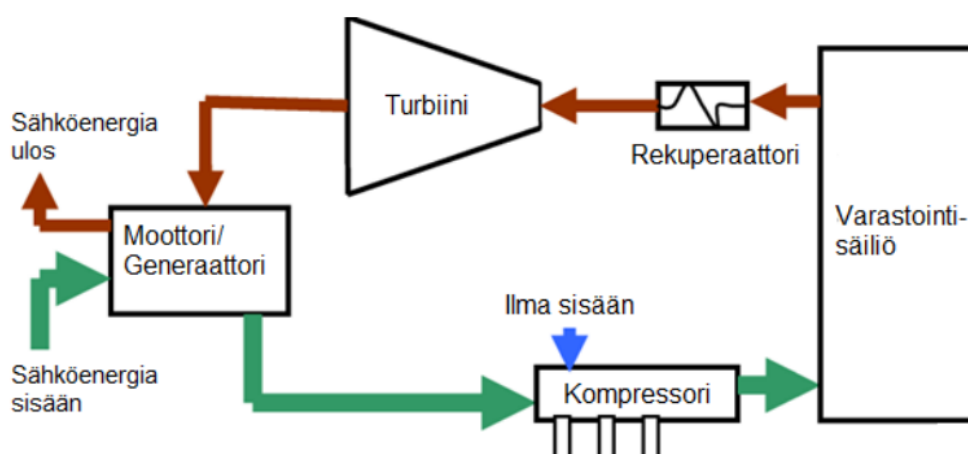
SMES-järjestelmän käyttö energiavarastona soveltuu isompien energian tuotantomuotojen tukemiseen, koska järjestelmän suhteelliset kustannukset muuttuvat kilpailukykyiseksi vasta isommassa mittakaavassa. Tulevaisuudessa ja nestemäisen tyypin saatavuuden parantuessa, SMES-järjestelmien käyttökustannukset tulevat pienemmään ja sen käyttö tulee luultavasti yleistymään myös pienempien järjestelmien energiavarastona (Shi et al. 2008).

4.7 Paineilmavarastot (CAES)

Energian tuotannosta hetkellinen ylijäämäenergia voidaan säilöä myös hyödyntäen CAES-varastoa. Sen toiminta perustuu paineistetun ilman varastointiin, josta se voidaan tarvittaessa muuntaa takaisin sähköenergiaksi energian kysynnän taas kasvaessa verkossa.

Varastointivaiheessa ilma paineistetaan sähkömoottorin ohjaamalla kompressoreilla korkeaan paineeseen, ilma jäädytetään ja säilötään paineilmaparastoon. Ilman jäädytys mahdollistaa suuremman varastointikapasiteetin sekä vähentää lämmöstä muodostuvaa stressiä varaston seinämiin. Varastona voidaan pienemmissä sovelluksissa käyttää metallisia säiliöitä, mutta paineilmaparastojen etu kasvaa järjestelmän kokoluokan kasvaessa. Tällöin ilman varastoinnissa usein hyödynnetään maanalaisia, louhittuja onkaloita, suolakivi- ja vesiesiintymiä. Tämän tyyppisten energiavarastojen kokoluokat ovat useita satoja megawatteja riippuen onkalon koosta sekä järjestelmän tehosta (Olabi et al. 2020).

Paineilmavarastoa purettaessa varastoitu ilma lämmitetään ja ohjataan turbiinille ja siitä generaattorille, joka muuttaa ilman takaisin sähköenergiaksi, jota voidaan taas hyödyntää sähköverkossa. Varastointivaiheessa muodostuu lämpöä, joka voidaan käyttää purkuvaiheessa ilman lämmitykseen ja näin nostaa järjestelmän hyötysuhdetta. Kuvassa 14 on CAES-energiavarasto, joka mallintaa varastointi- ja purkuprosessin. (Budt et al. 2016).



Kuva 14. Paineilmavaraston toimintavaiheet.

Paineilmavarastot sopivat paremmin isompiin kokonaisuuksiin, mutta niiden heikon hyötysuhteen (70 %) ansiosta niiden käyttö ei ole vielä yleistynyt (Aghahosseini & Breyer 2018). Hyötysuhdetta laskee merkittävästi tarve ilman jäädyttämisen- ja lämmittämisen prosessiin, mutta uudemmissa sovelluksissa on järjestelmään lisätty erillinen energiavarasto, jonka avulla lämpöenergiaa voidaan kierrättää prosessien välillä. Toinen paineilmavarastojen ongelma on niiden koko-vaatimukset sekä luontaisten esiintymien tarve. Suolavesiesiintymät eivät ole niin yleisiä, että se mahdollistaisi järjestelmien yleisemmän käytön ja kallioon louhittu onkalo tai isot maan pinnalle rakennetut paineilmäsäiliöt nostavat järjestelmän kokonaishintaa ja takaisinmaksuaikaa merkittävästi (Olabi et al. 2020). Uudempia paineilmasovelluksia ovat vedenalaiset, joustavat paineilmasäiliöt, jotka hyödyntävät meren pohjassa olevaa painetta. Purettaessa säiliötä veden paine työntää ilman säiliöstä kohti turbiinia, jolloin prosessi on energiatehokkaampi (Tiano & Rizzo 2021).

5. ENERGIAVARASTON VALINTA

Sopivan energiavaraston valinta riippuu täysin kohteen ominaisuuksista. Kaiken tyyppiin energian tuotantolaitoksiin voidaan löytää sopiva varastointimuoto sitä tehostamaan, mutta varaston valinnassa tulee ottaa huomioon erilaisia seikkoja. Energian varastotyypeissä etenkin hinta, järjestelmän purkuaika ja kapasiteetti, elinkaari sekä hyötysuhde ovat avaintekijöitä sopivan varaston valinnassa. (Kuva 15.) Toistaiseksi yksikään varasto ei voi tarjota käyttökohteeseen kaikkia parhaita ominaisuuksia. Varaston valinnassa tulee ottaa myös huomioon kohteen sijainti ja jo olemassa olevat ympäristön ominaisuudet kuten esimerkiksi maan muodoista johtuvat korkeuserot tai onkalot. Yleistä linjaa energiavaraston valinnalle on siis toistaiseksi mahdoton määrittää, koska erilaiset olosuhteet ja voimalan tuotantokapasiteetti sekä aiemmin mainitut ominaisuudet vaihtelevat kohteittain (Olabi et al. 2021).

Taulukko 2. Eri energiavarastotyyppien vertailu.

	Teho(MW)	Purku aika	Elinkaari	Energiatiheys (Wh/l)	Hyötysuhde
Pumpattu vesi	3000	4-16h	30-60v	0,2-2	70-85%
Puristettu ilma	1000	2-30h	20-40v	6	40-70%
Lämpö	150	1-24h	30v	70-210	80-90%
Li-ion bat.	100	1min-8h	n.10k sykliä	200-400	85-95%
Lead-acid bat.	100	1min-8h	6-40v	50-80	80-90%
Flow bat.	100	1min-8h	n.12k sykliä	20-70	60-85%
Vety	100	min-vko	5-30v	600(200bar)	25-45%
Vauhtipyörä	20	sek-min	20k-100k sykliä	20-80	70-95%

6. TORKKOLAN TUULIPUISTO

Vaasassa Merikaarrontien varrella sijaitseva Torkkolan tuulipuisto toimii hyvänä esimerkkinä mahdolliselle energiavarastolle, koska siellä ei ole käytetty minkäänlaista varastointiin tarkoitettua tekniikkaa. Tuulipuisto on kokoluokaltaan 52,8 MW ja se koostuu 16:sta 3,3 MW Vestaksen tuulivoimalasta. Voimaloidennapakorkeus on 137 m ja puiston vuosituotanto on n. 150 000 MWh luokkaa (Torkkolan tuulivoimapuisto Vaasassa 2015).



Kuva 16. Torkkolan tuulipuisto.

Kuten luvussa kolme aiemmin mainittiin, Pohjanmaa on alueena erinomainen ympäristö tuulivoiman tuottamiseen merellisen sijainnin sekä laakeiden alueidensa vuoksi. Energiavarastoa suunniteltaessa ei maastosta kuitenkaan saada hirvittävän isoja hyötyjä. Alueelta ei juurikaan löydy tyhjilleen jääneitä kaivoksia tai maanalaisia onkaloita, joissa paineilmaparastoja voitaisiin käyttää.

Veden pumppaamisessa hyödyksi käytettäviä maaston korkeuseroja ei ole käytettävissä ja edes meren pohjaan rakennettavat joustavat CAES-sovellukset eivät välttämättä toimi matalien vesistöjen takia riittävällä tehokkuudella, koska joustavat, merenalaiset painesäiliöt perustuvat syvässä vedessä muodostuvaan paineeseen. Lämpövarastojen hyödyntäminen voisi olla sopiva, joskin kallis vaihtoehto itsessään tämän kokoiseen puistoon, koska siihenkään ei maastosta hyödynnettäviä elementtejä löydy. Suprajohtavat magneettiset energiavarastot omaavat pitkän käyttöiän ja hyötysuhteen, mutta ongelmaksi kohteessa muodostuisi tarve tehokkaalle jäähdytysjärjestelmälle. Sama ongelma pätee vetyperustaisiin energiavarastoihin.

Yksi hyödynnettävä etu Pohjanmaalta kuitenkin löytyy ja se on tila. Tuulipuiston voimalat pystytään Torkkolan tapaan hajauttamaan isolle alueelle, joka mahdollistaa maan pinnalle rakennettavien energiavarastojen käytön ilman lisätilan tarvetta. Torkkolaan sopivan energiavaraston valintaan vaikuttaa sen käyttöikä, kapasiteetti sekä takaisinmaksuaika. Tiedostamalla täytettävät kriteerit ja vaatimukset energiavarastolta, saadaan irti suurin mahdollinen hyöty järjestelmästä.

Torkkolan reilun 50 MW kokonaistehon tukemiseksi sopivin varastointitekniikka olisi akkuvarasto. Vaikka lyijyakut ovat edullisia ja luotettavia eivät ne silti päihitä Li-ioniakkuja isommissa järjestelmissä. Koska energiavarastojen ympärillä vellova tutkimustyö keskittyy Li-ioni akkutekniikkaan sähköautoilun suosioista johtuen, tekee se niistä markkinoiden helpoiten saatavilla olevan vaihtoehdon. Verrattuna nikkeli-kadmium- tai lyijyakkuihin Li-ion-tekniikka on hyötysuhteeltaan ja tehokertoimeltaan parempi vaikkakin se on edellä mainittuja kalliimpi vaihtoehto.

Tilan puolesta järjestelmä sopisi alueelle hyvin ja esimerkkejä aikaisemmista, saman kokoluokan sovelluksista löytyy useita. Hyvänä esimerkkinä Wärtsilältä 2020 Mexicon La Paziin tilattu 10 MW akkujärjestelmä tukemaan Coromuelin tuulipuistoa, joka on myös kokoluokaltaan 50 MW:n luokkaa (50-MW Eolica Coromuel wind farm to get battery storage to help meet code requirements 2021).

Li-ioniakkujärjestelmä sopisi Torkkolan kokoiselle tuulipuistolle erinomaisesti ja 5–10 MWh varastointikapasiteetilla yleensä konttiyksiköihin sijoitettu järjestelmä tukisi puiston toimintaa, kun sääolosuhteet eivät ole suotuisat tuulivoimatuotantoon. Pääomakustannuksiltaan Li-ioniakut ovat 800–1 200 €/kWh ja järjestelmän kesto on arvioitu olemaan noin 15 vuotta. Hyötysuhteeltaan tämän tyyppinen järjestelmä on 78–88 % luokkaa.

7. YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin yleisimpiä energianvarastointimuotoja ja vertailtiin niiden soveltuvuutta Pohjanmaan alueella sijaitsevaan Torkkolan tuulivoimapuistoon. Energiavarastoja tarkasteltiin yleisesti sekä todettiin niiden kehityskaaren olevan vielä pääsääntöisesti alussa. Tämän lisäksi energiavarastojen tarpeellisuutta peilattiin tuulivoimatekniikkaan yleisellä tasolla.

Energiavarastojen tarve tulee tulevaisuudessa kasvamaan merkittävästi, kun päästörajoitukset korostavat uusiutuvien energiamuotojen tarvetta. Varastojen avulla voidaan tasata uusiutuvan energian tuotannossa muodostuvia piikkejä sekä katveja. Näin tuotanto voidaan mitoittaa täsmällisemmin, mutta silti tuottaa energiaa kustannustehokkaasti ja näin madaltaa kynnystä uusiutuvan energiatuotannon siirtymiseen isommissakin mittakaavoissa.

Yhä tehokkaimpana varastointimuotona toimii vesivoima, joka on markkinoilla tällä hetkellä hallitsevin energian varastointimuoto sen suuren varastointikapasiteetin ja taloudellisuuden vuoksi. Myös paineilmaparastot ovat kasvattaneet suosiotaan, mutta ne molemmat vaativat toimiakseen sopivan ympäristön, jota ei kaikissa kohteissa ole saatavilla. Akkutekniikan kehittyessä ja hintojen jatkuvasti laskiessa uskon, että se tulee täyttämään suuren osan tulevaisuudessa kasvavan energiavarastojen kysynnän tarpeesta. Vetyvarastot ja magneettiset energiavarastot sopivat tiettyihin pienemmän luokan kohteisiin, mutta tuskin tulevat yleistymään laajemmassa mittakaavassa vaativien käyttölämpötilojen vuoksi.

Sopivan energiavaraston sovittaminen tuulivoimatuotantoon on täysin riippuvainen käyttökohteen koosta sekä lähellä olevasta ympäristöstä. Siksi yhtä oikeaa ratkaisua ei voi määrittää yleisellä tasolla.

8. LÄHTEET

Aarhus University 2021. *Denmark's largest battery - one step closer to storing green power in stones*. Viitattu 20.3.2022

ABB 2011. *Technical applications of wind power plants*. Viitattu 12.3.2022

Abood & Saiad Ali 2020.

Aghahosseini, A., & Breyer, C. 2018. Assessment of geological resource potential for compressed air energy storage in global electricity supply. *Energy Conversion and Management*, 169, 161–173.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.058> Viitattu 20.5.2022

Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S., & Saari, P. 2003. *Energian varastoinnin nykytila*. Viitattu 12.3.2022

Budt, M., Wolf, D., Span, R., & Yan, J. 2016. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments. In *Applied Energy* (Vol. 170, pp. 250–268). Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.108> Viitattu 23.3.2022

Dr. Anand Bhatt, Professor Maria Forsyth, Professor Ray Withers, & Professor Guoxiu Wang. How a battery works. Viitattu 10.5.2022

Edwards, P. P., Kuznetsov, V. L., & David, W. I. F. 2007. Hydrogen energy. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1965> Viitattu 25.3.2022

Francesco Antonio Tiano, & Gianfranco Rizzo. 2021. *Use of an Under-Water Compressed Air Energy Storage*. Viitattu 11.5.2022

Hydrogen Production and Distribution.

H2-Hub in Germany.

IEA, *Global Energy Review 2021*. Viitattu 13.3.2022

Joyce Lee, & Feng Zhao 2021. <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>

Jongerden, M. R. & Haverkort, B. R. *Battery Modeling*. Viitattu 10.5.2022

Jonathan Spencer Jones. (2022). *H2-Hub in Germany*.

<https://www.enlit.world/decarbonisation/green-hydrogen-hub-for-rural-northern-germany/> Viitattu 10.5.2022

Li, G 2016. Sensible heat thermal storage energy and exergy performance evaluations. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 53, pp. 897–923). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.006> Viitattu 20.3.2022

Linquip Team 2021. *Superconducting Magnetic Energy Storage*. Viitattu 21.5.2022

Macías, Martín, & Académico 2014. Viitattu 12.3.2022

Miceli, Francesco. *Wind turbine tower as a water battery: the Gaildorf Wind-Water Project*. Viitattu 12.3.2022

Nechlin, Wind powered water heater. Viitattu 20.3.2022

Nuutinen, T., Aki, T., Tkt, G. & Tiainen, J 2020. *LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT School of Energy Systems Energiatekniikan koulutusohjelma Joustavarakenteinen tuuliturbiinin siivistö*. Viitattu 13.3.2022

Olabi, A. G., Wilberforce, T., Ramadan, M., Abdelkareem, M. A. & Alami, A. H. 2020. Compressed air energy storage systems: Components and operating parameters – A review. In *Journal of Energy Storage*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102000> Viitattu 13.5.2022

Pekka Peljo 2021. *Aurinko- ja tuulivoiman kasvun myötä sähkön varastointi on aiempaa hankalampaa ja hintavaihtelut suurempia*. Viitattu 13.3.2022

Przemyslaw Komarnicki, Pio Lombardi & Zbigniew Styczynsk. 2017. *Electric Energy Storage Systems*. Viitattu 23.3.2022

Rauhala, A.-M. *ENERGIANTUOTANTO POHJANMAALLA JA ETELÄ-POHJANMAALLA 2050 RAPORTTI Vastaanottaja: Etelä-Pohjanmaan liitto ja Pohjanmaan liitto*. <https://fi.ramboll.com> Viitattu 16.4.2022

Shi, J., Tang, Y. J., Ren, L., Li, J. D. & Chen, S. J. 2008. Application of SMES in wind farm to improve voltage stability. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 468 <https://doi.org/10.1016/j.physc.2008.05.135> Viitattu 21.5.2022

Suomen tuulivoimayhdistys 2022. <https://tuulivoimayhdistys.fi/> Viitattu 19.2.2022

Suomen tuulivoimayhdistys 2019. *Tuulivoimaloiden rakenne*. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne> Viitattu 19.2.2022

Torkkolan tuulivoimapuisto Vaasassa 2015. <https://www.epvtuulivoima.fi/project/torkkolan-tuulivoimapuisto-vaasassa/> Viitattu 16.4.2022

Wicki, S., & Hansen, E. G. 2017. Clean energy storage technology in the making: An innovation systems perspective on flywheel energy storage. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.132> Viitattu 23.3.2022

50-MW Eolica Coromuel wind farm to get battery storage to help meet code requirements 2021. Viitattu 10.5.2022