

Mikael Eskelinen

ENERGIAN VARASTOINTI HAJAUTETUSSA ENERGIANTUOTANNOSSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Tutkijatohtori Kari Lappalainen
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Mikael Eskelinen: Energian varastointi hajautetussa energiantuotannossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Huhtikuu 2021

Työssä tutustuttiin energian varastointiin hajautetun energiantuotannon yhteydessä. Aurinko- ja tuulivoimaloiden toimintaperiaatteet käsiteltiin lyhyesti. Lisäksi tutkittiin hajautetun energiantuotannon yhteyteen sopivien energiavarastojen toimintaperiaatteita ja teknologian nykytilaa. Tutkittavia energiavarastoja olivat akku, vetyvarasto, vauhtipyörä ja SMES (engl. superconducting magnetic energy storage). Pitkäaikaisille energiavarastoille, akulle ja vetyvarastolle, laskettiin hyötysuhde ja kustannukset 36 MWh:n kapasiteetilla ja 3 pv:n varastointiajalla. Lyhytaikaisille energiavarastoille, vauhtipyörälle ja SMESille, laskettiin hyötysuhde ja kustannukset 500 kWh:n kapasiteetilla ja varastointiajalla 1 h. Energiavarastojen tehoksi oletettiin 1 MW.

Akun toiminta perustuu sähköenergian ja kemiallisen energian välisiin muunnoksiin. Anodilla ja katodilla tapahtuvat hapetus–pelkistys-reaktiot saavat aikaan elektronien liikkeen ulkoisen piirin kautta. Akkuteknologia on varsin kehittyntä ja niitä on käytetty jo pitkään sähköenergiajärjestelmien tukena. Akut sopivat hyvin pitkäaikaiseen energian varastointiin. Energiavarastona akun hyötysuhteeksi laskettiin noin 77–86 %. Kustannuksiksi laskettiin noin 14,4 milj. €.

Vetyvaraston toimintaperiaate on sähköenergian muuttaminen vedyksi ja takaisin sähköenergiaksi. Sähköenergia muutetaan vedyksi elektrolyytilaitteistolla. Tämän jälkeen vety varastoidaan joko paineistettuna kaasuna, jäähdytettynä nesteenä, metallihydridinä tai fyysisesti hiileen sidottuna. Varastoinnin jälkeen vety voidaan muuttaa takaisin sähköksi polttokennolla. Tällaisia vetyvarastojärjestelmiä ei ole käytetty muutamia pilottihankkeita lukuun ottamatta. Vetyvarasto sopii hyvin pitkäaikaiseen energian varastointiin. Energiavarastona vetyvaraston hyötysuhteeksi laskettiin noin 22–34 %. Kustannuksiksi laskettiin noin 3,6 milj. €.

Vauhtipyörän toiminnan perusperiaatteena on sähköenergian ja liike-energian välinen muunnos. Vauhtipyörän yhteydessä olevalla moottori-generaattorilla energiavarastoa voidaan ladata ja purkaa muuttamalla vauhtipyörän pyörimisnopeutta. Jos vauhtipyörän laakeroinnissa käytetään suprajohtavaa magneettilaakerointia, vauhtipyörän resistiivisiä häviöitä saadaan pienennettyä merkittävästi. Suurien kitka- ja ilmanvastushäviöiden takia vauhtipyöräteknologiaa on käytetty pääasiassa lyhytaikaiseen energian varastointiin. Energiavarastona vauhtipyörän hyötysuhteeksi laskettiin noin 67–77 %. Kustannuksiksi laskettiin noin 0,2–0,4 milj. €.

SMESissä sähköenergia muutetaan tasavirraksi, joka kiertää suprajohtavassa käämissä. Sähköenergia varastoituu syntyvään magneettikenttään. Suprajohtavuus tarkoittaa sitä, että kriittisen lämpötilan alapuolella aineen resistiivisyys katoaa. SMES-teknologia on kaupallistunut erityisesti alhaisen lämpötilan SMESien osalta. SMESit sopivat jäähdytystarpeen takia parhaiten lyhytaikaiseen energian varastointiin. Energiavarastona SMESin hyötysuhteeksi laskettiin noin 85 %. Kustannuksiksi laskettiin noin 0,5 milj. €.

Avainsanat: hajautettu energiantuotanto, energiavarasto, akku, vetyvarasto, vauhtipyörä, SMES

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Johdanto	1
2.	Hajautettuun energiantuotantoon siirtymisen vaikutukset	3
2.1	Aurinkovoima	3
2.2	Tuulivoima	5
3.	Energiavarastojen toimintaperiaatteet ja teknologian nykytila	8
3.1	Akku	8
3.1.1	Toimintaperiaate	8
3.1.2	Teknologian nykytila	10
3.2	Vetyvarasto	12
3.2.1	Toimintaperiaate	12
3.2.2	Teknologian nykytila	15
3.3	Vauhtipyörä	16
3.3.1	Toimintaperiaate	17
3.3.2	Teknologian nykytila	19
3.4	SMES	20
3.4.1	Toimintaperiaate	20
3.4.2	Teknologian nykytila	22
4.	Energiavarastojen tunnuslukujen vertailu	23
4.1	Akku	24
4.2	Vetyvarasto	24
4.3	Vauhtipyörä	24
4.4	SMES	25
4.5	Vertailu	25
5.	Yhteenveto	28
	Lähteet	30

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen torjuminen on mullistanut energiantuotantoa ympäri maailman. Muun muassa EU aikoo vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vuoteen 2030 mennessä 55 % vuoden 1990 tasosta. Päästövähennystavoitteeseen pyritään EU:n tasolla päästökaupalla. EU:n tavoite on vähentää kasvihuonekaasupäästöjä päästökaupalla vuoteen 2030 mennessä 43 % vuoden 2005 tasosta. Päästökauppasääntelyn piiriin kuuluvat muun muassa sähkön- ja lämmöntuotanto sekä suuret teollisuuslaitokset. Päästökauppa tarkoittaa sitä, että sääntelyn piiriin kuuluville laitoksille myönnetään kausittain päästöoikeuksia, joiden määrää vähennetään aika ajoin. Päästöoikeuksien vähenemisen myötä niiden hinnat nousevat. Tämä tarkoittaa sitä, että fossiilisten polttoaineiden käyttö muuttuu ennen pitkää kannattamattomaksi. Lisäksi EU on linjannut, että uusiutuvan energiantuotannon osuus energiantuotannosta nousee 32 %:iin vuoteen 2030 mennessä. Kansallisella tasolla nykyinen hallitus on asettanut tavoitteeksi Suomen hiilineutraaliuden vuoteen 2035 mennessä. [1][2]

Jotta sähköverkko pysyy tasapainossa, on tuotannon ja kulutuksen oltava joka hetki likimain samat. Taajuuden vaihtelulle sallitut rajat ovat 49,9–50,1 Hz. Kantaverkkoyhtiö Fingrid huolehtii sähköverkon tasapainosta säätösähkömarkkinoilla, sekä varaamalla tuotantoreservejä. EU:n ja Suomen ilmastopolitiikka kuitenkin vähentää säädettävään sähköntuotantoon kykenevien voimalaitosten määrää. Tulevaisuudessa säädettävä sähköntuotanto lienee pääasiassa vesivoimalla tuotetun sähkön varassa, jota Suomen oman tuotannon lisäksi tuodaankin tällä hetkellä Pohjois-Ruotsista. [3][4]

Lisäksi uusiutuvan energiantuotannon lisääntyminen lisää sähköntuotannon säätelyn tarvetta, koska uusiutuvat energiamuodot ovat erittäin sääriippuvaisia. Esimerkiksi aurinkovoimalan tuotanto vaihtelee paljon tunneittain ja jopa hetkittäin, koska tuotanto on riippuvainen muun muassa auringonsäteilyn intensiteetistä, lämpötilasta ja pilvisyydestä. Tuulivoimalan päivittäiset, viikoittaiset ja kausittaiset vaihtelut ovat suuria. Tuulivoiman määrä energiantuotannossa on myös lisääntymässä merkittävästi, vaikka uusilla tuulivoimaloilla ei ole enää syöttötariffia. Tuulivoimalla tuotetaan jo 9,6 % Suomessa käytetystä sähköstä [5]. Nämä säätelyongelmat ovat tulevaisuudessa siis merkittäviä. Ratkaisuna niihin voisivat olla energiavarastot. Energiavarastoilla voidaan tasata tuotannon vaihtelua ja säilyttää sähköverkko tasapainossa, ja varmistaa tulevaisuudessa sähkön riittävyys myös kulutus-huipuissa. [6]

Tässä työssä tutustutaan erilaisiin energian varastointitapoihin hajautetun energiantuotannon yhteydessä. Hajautetusta energiantuotannosta käsitellään lyhyesti aurinko- ja tuulivoiman toimintaperiaatteet sekä niiden vaikutukset sähköverkkoon. Energian varastointitavoista analysoidaan niiden toimintamekanismeja sekä teknologian nykytilaa. Käsiteltäviä varastointimuotoja ovat akku, vetyvarasto, vauhtipyörä ja suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto. Lopuksi vertaillaan eri varastointitapojen hyötysuhdetta ja kustannuksia.

2. HAJAUTETTUUN ENERGIAN TUOTANTOON SIIRTYMISEN VAIKUTUKSET

Hajautetulla energiantuotannolla tarkoitetaan yleisimmin sellaista tuotantoa, joka

- on lähellä kulutusta
- on yksikkökooltaan korkeintaan muutama sata MW
- ei ole kytketty korkeajännitteiseen siirtoverkkoon. [7, s. 726][8, s. 2]

Tyypillisimpiä hajautetun energiantuotannon tuotantomuotoja ovat aurinkovoima, tuulivoima, ja biomassan poltto. Tässä luvussa käsitellään aurinkovoiman ja tuulivoiman toimintaperiaatteet, sekä minkä takia energiavarastoilla on tulevaisuudessa tärkeä osa varsinkin näiden energiamuotojen tuotannossa.

2.1 Aurinkovoima

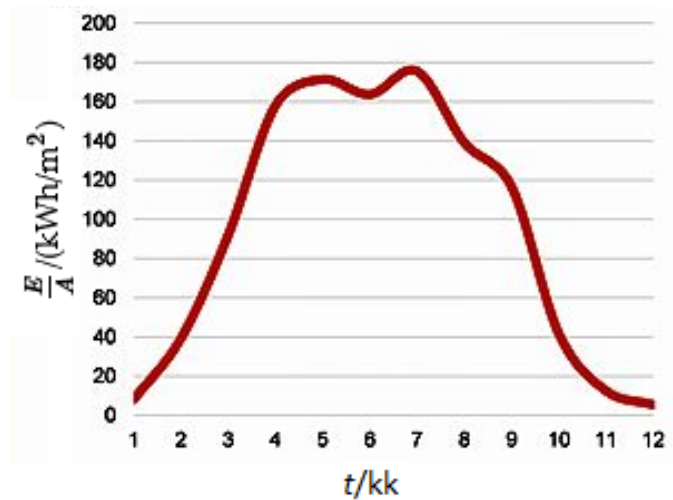
Yksittäinen aurinkopaneeli koostuu useasta aurinkokennosta. Tyypillisin aurinkokennomateriaali on yksi- tai monikiteinen pii. Pii toimii aurinkokennossa puolijohteena. Aurinkokennossa on p-puoli ja n-puoli, jotka muodostuvat, kun piihin lisätään eri puolille epäpuhtausatomeja. Näillä puolilla on erilainen varausjakauma. Tästä syystä aurinkokennoon muodostuu sähkökenttä p- ja n-puolen välille. [9, s. 90–91, 98]

Auringon säteilypartikkelilla, fotonilla, on tietty määrä energiaa. Jos foton on tarpeeksi energoittinen, se voi virittää aurinkokennossa elektronin johtavuusvyölle. Siirtyessään johtavuusvyölle elektroni jättää valenssivyölle aukon. Aukko ja elektroni alkavat sähkökentän vaikutuksesta kulkeutua aurinkokennossa eri suuntiin ulkoista piiriä pitkin. [9, s. 98, 103] Tämä synnyttää sähkövirran. Auringon säteilyteho vaikuttaa siis merkittävästi aurinkokennon tuottaman sähköenergian määrään.

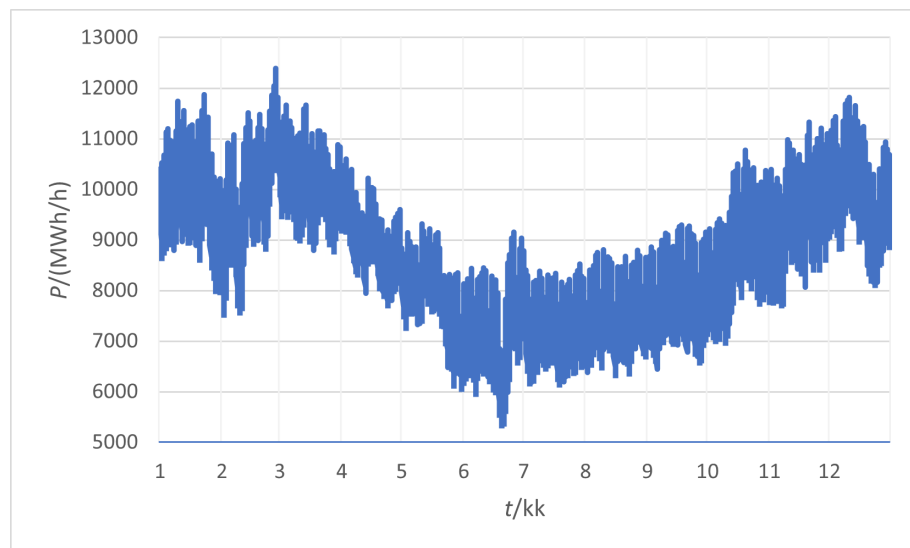
Aurinkopaneelin jännitetaso saadaan halutuksi kytkemällä aurinkokennoja sopivasti sarjaan ja rinnan. Aurinkopaneelin tuottama sähkövirta on tasavirtaa. Jotta tasavirta voidaan syöttää verkkoon, täytyy se muuttua vaihtovirraksi vaihtosuuntaajalla. Ennen verkkoon syöttämistä jännitetaso muutetaan sopivaksi muuntajalla. [10, s. 19]

Auringon säteilytehon ja sitä kautta kokonaissäteilyenergian määrä vaihtelee Suomessa voimakkaasti, painottuen kesäkuukausille kuvan 2.1 mukaisesti. Sitä vastoin sähkön kulu-

tus Suomessa painottuu voimakkaasti talvikuukausille kuvan 2.2 mukaisesti. Kuvassa 2.1 E tarkoittaa kokonaissäteilyenergiaa, A pinta-alaa ja t aikaa. Kuvassa 2.2 P tarkoittaa tehoa ja t aikaa.



Kuva 2.1. Auringon kokonaissäteilyenergian summa 45 asteen kulmassa etelään päin suunnatulle pinnalle [11] mukailten



Kuva 2.2. Sähkön kulutus Suomessa tunneittain, vuosi 2020. [12]

Säteilytehon määrä ei täysin suoraan korreloi aurinkopaneelin tuottaman tehon määrään, koska aurinkopaneelin hyötysuhde on lähtökohtaisesti parempi, mitä viileämpi paneeli on. Se antaa kuitenkin osviittaa, mille kuukausille suurin teho painottuu. Aurinkopaneelien suurin teho painottuu juuri niille kuukausille, jolloin kulutus on kaikkein pienintä.

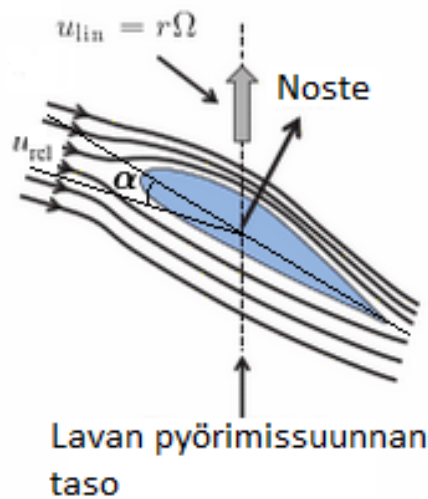
Tavanomainen synkronoitu generaattori pystyy pelkästään liike-energiansa ansiosta syöttämään nimellistehoa tyypillisesti 2–10 s. Aurinkovoimaloilla ei liike-energiaa ole, joten jos aurinkovoimatuotanto lisääntyy voimakkaasti, tuotannon hetkelliset vaihtelut vaikutta-

vat myös sähköverkon stabiilisuuteen. Myös tuotantohuiput saattavat vaatia rajoittamaan tuotantoa. [13, s. 1–2]

Aurinkovoiman lisääntyessä tuotannon ja kulutuksen vaihteluita on tasattava säädettävällä sähköntuotannolla tai käyttämällä energiavarastoja. Koska säädettävä sähköntuotanto on kuitenkin vähenemässä, tullaan hajautetussa energiantuotannossa tarvitsemaan laajasti energiavarastoja. Aurinkovoiman yhteydessä energiavarastoja voidaan käyttää myös suuntaajien hyötysuhteen maksimointiin, koska suuntaajien hyötysuhde riippuu voimakkaasti käyttötehoasteesta [14, s. 330].

2.2 Tuulivoima

Tuulivoimassa tuulen liike-energia pyörittää tuulivoimalan lapoja. Lavat on muotoiltu siten, että ilmavirtaus aiheuttaa lapaan nosteen. Noste perustuu lapojen ylä- ja alapuolella vallitsevaan paine-eroon samalla tavalla kuin lentokoneen siivissä. Tuulivoimalan lapaan vaikuttavaa nostetta on havainnollistettu kuvassa 2.3. Kuva on piirretty lavan kärjestä, ja lapa on kohoamassa y-akselin suuntaan.



Kuva 2.3. Tuulivoimalan lapaan vaikuttava noste [15, s. 268] mukailten

Tuulivoimalan lavalle tuleva ilmavirtaus ei ole vaakasuunnassa johtuen siitä, että lavan oma nopeus muuttaa lavan kokeman ilmavirtauksen, suhteellisen tuulennopeuden u_{rel} , tulokulmaa. Lavan omasta nopeudesta johtuva nopeuskomponentti tietyssä pisteessä, u_{lin} , on riippuvainen pisteen etäisyydestä r keskipisteeseen ja kulmanopeudesta Ω . Nostovoima (piirretty kuvassa), jonka lapa kokee, on 90 asteen kulmassa suhteellisen tuulennopeuden suuntaan. Tämän nostovoiman y-komponentti saa aikaan sähköntuotannon generaattorissa, ja se on riippuvainen suhteellisen tuulennopeuden ja lavan keskilinjan kohtauskulmasta α . Koska lavan kokema suhteellinen tuulennopeus muuttuu etäisyyden funktiona, lavassa on kierrettä kärkeä kohti halutun kohtauskulman ylläpitämiseksi. [15,

s. 268–270]

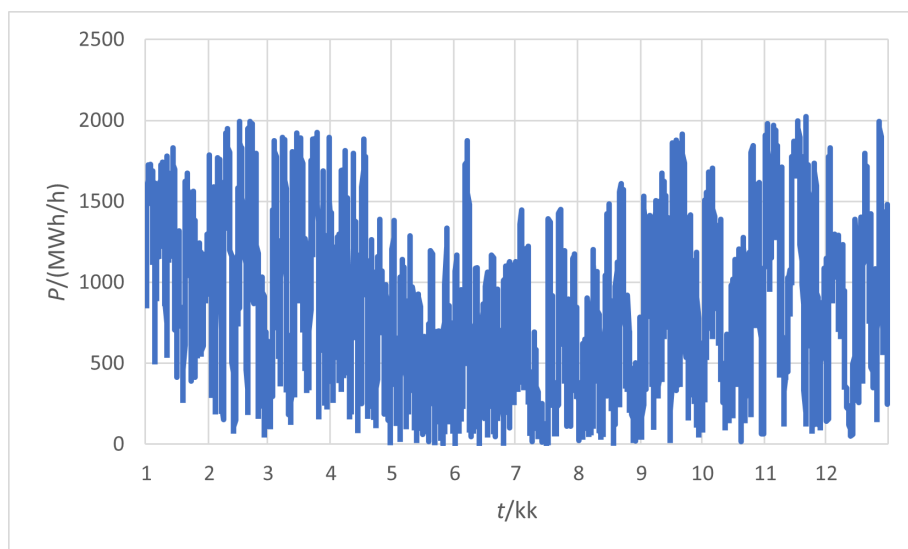
Ilmavirtauksen teho P_0 tuulivoimalalle voidaan laskea kaavan

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 \quad (2.1)$$

mukaisesti, jossa ρ on ilmatiheys, A tuulivoimalan lapojen kokonaispyyhkäisyypinta-ala, ja v_0 tuulen nopeus. Ilmavirtauksen teho on siis riippuvainen tuulen nopeuden kolmannesta potenssista. Tuulen nopeuden vaihtelut vaikuttavat siis erittäin merkittävästi tuulivoimatuotantoon. Teoreettinen maksimihyötysuhde jolla tuulivoimala voi tätä tehoa hyödyntää on Betzin lain mukaan 59 %. Todellisuudessa hyötysuhteet jäävät tämän alle. [15, s. 267]

Tuulivoimalan lavat pyörivät akselin ympäri. Akseli voi olla joko suoraan tai vaihteiston kautta kytketty generaattoriin [16, s. 25]. Generaattori tuottaa vaihtosähköä, ja se voidaan syöttää verkkoon, kun jännitetaso on säädetty sopivaksi muuntajalla.

Suomessa tuulee eniten talvikaudella [17]. Kuvassa 2.4 on esitelty Suomen tunneittaista tuulivoimatuotantoa vuoden ajalta. Kuvassa P tarkoittaa tehoa ja t aikaa. Nähdään, että tuulivoimatuotannon vaihtelu on erittäin suurta. Kausittainen vaihtelu on kulutuksen kannalta suotuisaa, sillä tuotanto painottuu eniten ajalle, jolloin kulutuskin on suurin. Tuotanto vaihteli vuonna 2020 välillä 0–2025 MW. Keskiarvotuotanto oli 823 MWh/h [6]. Tuulivoimatuotannon hetkelliset vaihtelut eivät kuitenkaan liene niin suuria kuin aurinkovoimalla, koska tuulivoimalan lapojen inertia tasaa tuotannon vaihteluita.



Kuva 2.4. Tuulivoiman tuotanto tunneittain Suomessa, vuosi 2020. [6]

Kaiken kaikkiaan, tuulivoimatuotannon pidempiaikaiset vaihtelut ovat erittäin merkittäviä sähköverkon tasapainon kannalta. Vaihtelua on tähän asti kompensoitu säädettävällä sähköntuotannolla. Koska säädettävä sähköntuotanto vähenee, ja tuulivoiman osuus energiantuotannosta kasvaa, tarvitaan kuitenkin energiavarastoja tuotanto- ja kulutus-

huippujen tasaamiseen.

3. ENERGIAVARASTOJEN TOIMINTAPERIAATTEET JA TEKNOLOGIAN NYKYTILA

Energiavarastoja ovat muun muassa akut, vetyvarastot, vauhtipyörät, suprajohtavat sähkömagneettiset energiavarastot, paineilmalaitokset ja pumppuvoimalaitokset. Tässä työssä keskitytään hajautetun energiantuotannon pienehköihin yksiköihin sopiviin energiavarastoihin. Tästä syystä tarkastelusta on jätetty pois muun muassa paineilmalaitokset ja pumppuvoimalaitokset.

Tässä luvussa tarkastellaan, miten erilaisia energiavarastoja voidaan käyttää hajautetussa energiantuotannossa. Tarkasteltavia energiavarastoja ovat akku, vety, vauhtipyörä ja suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto. Energiavarastoista tutustutaan niiden toimintaperiaatteisiin ja teknologian nykytilaan.

3.1 Akku

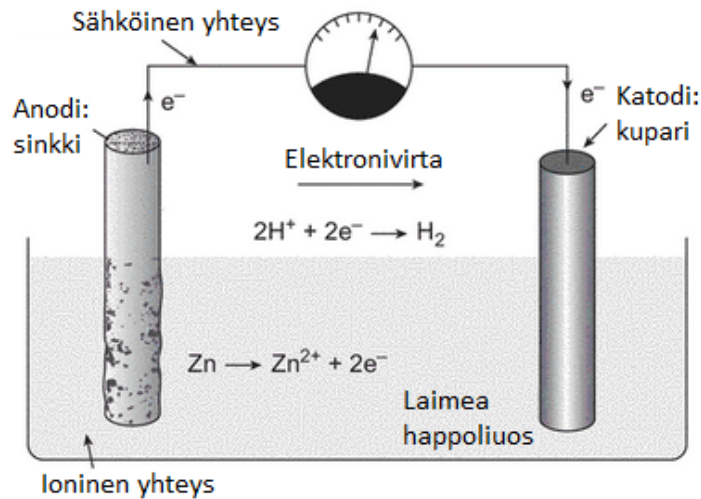
Akku on tunnetuimpia sähköenergian talteenottoon käytettyjä energiavarastoja. Kun akkua ladataan, se muuttaa sähköenergian kemialliseksi energiaksi. Vastaavasti, kun akkua puretaan, se muuttaa kemiallisen energian sähköenergiaksi.

Tässä alaluvussa tarkastellaan akkujen toimintaperiaatetta ja sitä, miten niitä voidaan käyttää sähköverkkoon kytkettynä. Teknologian nykytilasta käsitellään akkujen keskeisimmät nykyiset tyypit, käyttökohteet, sekä tulevaisuuden kehityssuunnat.

3.1.1 Toimintaperiaate

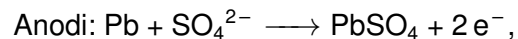
Perinteistä akkua voidaan mallintaa galvaanisena kennona. Galvaanisessa kennossa on 2 erilaisen sähköisen potentiaalın omaavaa elektrodia elektrolyytissä. Kun nämä 2 elektrodia yhdistetään ulkoisen piirin kautta, syntyy sähkövirta. [18, s. 3] Tällaisen kennon toimintaperiaatetta mallintaa kuva 3.1. Tässä esimerkkikuvassa elektrodimateriaalina toimivat sinkki ja kupari.

Akussa kulkee elektroneja elektrodilta toiselle ulkoisen piirin kautta. Jotta akun sisäinen varaustasapaino säilyy, akussa tapahtuu hapetus–pelkistys-reaktio. Hapetus–pelkistys-

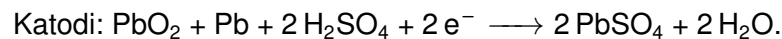


Kuva 3.1. Galvaanisen kennon toimintaperiaate [19, s. 298] mukailten

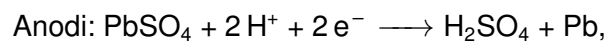
reaktiossa toinen elektrodeista hapettuu ja toinen pelkistyy. Reaktioon tarvitaan myös elektrolyytti, jota pitkin ionit kulkeutuvat elektrodilta toiselle. [19, s. 298–299] Tavallisessa lyijyhappoakussa tapahtuvat reaktiot ovat



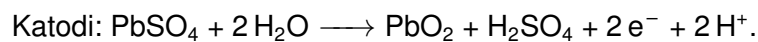
ja



Elektrolyytinä toimii tässä tapauksessa H_2SO_4 . Vastaavasti akun latautuessa tapahtuvat reaktiot ovat



ja



Lyijyakun latautuessa aiemmin hajonnutta lyijyä ja lyijyoksidia muodostuu siis uudestaan. [18, s. 10]

Vaikka erilaisia akkutyyppejä on useita, niiden toimintaperiaate on useimmiten sama. Kennossa elektrodien välinen potentiaaliero synnyttää sähkövirran, kun elektrodit yhdistetään ulkoisen piirin kautta. Kun akku purkautuu, tapahtuu hapetus–pelkistys-reaktio, ja toinen elektrodeista kuluu. Akun latautuessa reaktio on vastakkainen, ja elektrodi muodostuu uudestaan. Elektrolyytti mahdollistaa akun sisäisen varaustasapainon säilymisen mahdollistamalla ionien liikkeen. Haluttu akkujännite saadaan aikaan kytkemällä kennoja sopivasti sarjaan ja rinnan [20, s. 512].

Koska akun toiminta perustuu tasavirtaan, täytyy tuulivoimalla tuotettu vaihtovirta muut-

taa tasavirraksi tasasuuntaajalla. Aurinkovoimalla tuotettu sähkö on tasasähköä, joten sitä ei tarvitse erikseen muuttaa. Ennen verkkoon syöttämistä akusta otettu sähkö täytyy muuttaa vaihtosähköksi vaihtosuuntaajalla.

3.1.2 Teknologian nykytila

Akkuteknologia on tunnettu jo varsin pitkään, ja sähköverkkoon kytkettyjä lyijyakkuja on esimerkiksi ollut jo 1980-luvulla [21, s. 153]. Muutamia muitakin verkkoon kytkettyjä akusovelluksia on otettu käyttöön 2000-luvun jälkeen.

Tyypillisimpiä akkuja joita on käytetty uusiutuvan energiantuotannon tukena, ovat

- lyijyhappoakut
- litiumioniakut
- natrium–rikki-akut
- vanadiumakut [22, s. 480–483].

Näistä kaikkein käytetyin akkutyyppeistä on lyijyhappoakku, jonka teknologia on kaikkein vanhin ja edistynein. Tuoreimpia edistysaskelia lyijyhappoakkujen valmistuksessa on muun muassa akkujen valmistamisen roiskesuojatuksi VRLA-tekniikalla (engl. Valve Regulated Lead Acid). [20, s. 513][22, s. 480] Lyijyhappoakun hyötyjä ovat muun muassa halpa hinta ja valmistuksen helppous [22, s. 480]. Lyijyhappoakun haittoja ovat puolestaan sen sisältämät raskasmetallit, sekä sen 2–5 %:n itsestäänpurkautuvuus per kuukausi [20, s. 513][23, s. 16].

Lyijyhappoakkuja on ollut tasapainottamassa verkon toimintaa jo pitkään. Esimerkki lyijyhappoakkujen toiminnasta on Tasmanian King Islandille asennettu 3 MW:n lyijyhappoakun ja superkondensaattorin yhdistelmä. Saaren sähköverkko ei ole kytketty muuhun sähköverkkoon. Yhdistelmä varastoi uusiutuvan energian ylijäämätuotantoa, ja auttaa muun muassa taajuuden hallinnassa. Yhdistelmä on mahdollistanut sen, että saaren verkko toimii usein yhtäjaksoisesti yli vuorokauden kestäviä aikoja uusiutuvan energian tuotannolla. Tämän ansiosta fossiilisten polttoaineiden käyttö saaren sähköntuotannossa on vähentynyt voimakkaasti. [21, s. 155]

Litiumioniakuilla arvioidaan olevan eri akkutyypeistä kaikkein suurin kehityspotentiaali [20, s. 513]. Litiumioniakkujen etuja ovat korkea energiatehokkuus ja hyvä lataus–purkaukshyötysuhde 85–95 % (engl. roundtrip-efficiency, vakiintunutta suomennosta ei ole, tässä työssä käytetään termiä lataus–purkaus-hyötysuhde) [22, s. 481]. Lataus–purkaukshyötysuhde tarkoittaa energiavaraston purusta saatavan energian suhdetta energiavaraston lataukseen vaadittavaan energiaan. Litiumioniakkujen itsestäänpurkautuvuus on noin 1 % per kuukausi [23, s. 16]. Niiden haittapuolena on korkea hinta, ja akun heikentyminen, jos akkuä käytetään sen suositellun toimintalämpötilan ulkopuolella. Litiumioniakuis-

sa joudutaankin käyttämään kontrollipiiriä akun suojelemiseksi. [20, s. 513][22, s. 482]

Litiumioniakkuja on jo jonkin aikaa käytetty verkkoon kytkettyinä energiavarastoina [24, s. 595]. Litiumioniakkuja on käytetty esimerkiksi taajuudenhallinnassa ja kuormitushuippujen tasauksessa [25, s. 213]. Esimerkiksi USA:n Laurel Mountainiin asennettiin jo vuonna 2011 32 MW:n litiumakkupohjainen energiavarasto taajuudenhallintaan ja reservikapasiteetiksi [26, s. 3].

Natrium–rikki-akut ovat varsin kehittyneitä teknologiaa korkean energiatiheuden omaavien akkujen joukossa [20, s. 513][27, s. 241]. Natrium–rikki-akut ovat niin sanottuja korkean lämpötilan akkuja, jotka vaativat toimiakseen noin 300 °C lämpötilan [27, s. 242]. Niiden toiminta vaatii natriumin ja rikin pitämisen sulana ja hyvän johtavuuden saavuttamisen elektrolyytissä [21, s. 151]. Natrium–rikki-akuille on ominaista korkea lataus-purkaus-hyötysuhde, sekä nopea ja hyvä tehonsyöttö. Haittana on se, että akku täytyy pitää käyttämättömänäkin noin 300 °C lämpötilassa, jotta akun ominaisuudet eivät heikenny. [24, s. 597–598]

Natrium–rikki-akut sopivat erityisesti uusiutuvien energianlähteiden yhteyteen tasaamaan tuotanto- ja kulutushuippuja [24, s. 597][27, s. 242]. Niitä on käytetty verkkoon kytkettyinä muun muassa Japanissa, USA:ssa ja Kiinassa. Suurin natrium–rikki-akkujärjestelmä asennettiin Japanin Futamataan vuonna 2008. Se toimii parhaimmillaan 34 MW:n teholla ja 244.8 MWh:n kapasiteetilla. Järjestelmän päätehtävä on tasoittaa 51 MW:n tuulivoimakompleksin tuotantoa. [27, s. 242]

Vanadiumakkujen toimintaperiaate on hieman erilainen kuin muiden akkujen. Niissä elektrolyytit ovat molemmille elektrodeille erit, ja niitä kierrätetään elektrodeille ulkoisista säiliöistä pumppujen avulla. Vanadiumakkujen hyötyjä ovatkin muun muassa pitkä elinikä ja varastoinnin tehokkuus. Vanadiumakut eivät purkaudu lainkaan itsestään. [20, s. 513]. Haittoja ovat muun muassa pienempi energiatiheys verrattuna muihin akkuteknologioihin [22, s. 483]. Koska vanadiumakuissa elektrolyyttiä täytyy pumpata elektrodeille, niissä suositetaan yleensä pidempää yhtäjaksoista käyttöaikaa (1 h tai enemmän), kuin suurta tehoa. Tämän takia ne sopivat paremmin tuotanto- tai kulutushuippujen tasaukseen, kuin esimerkiksi jännitteensäätöön. [24, s. 597]

Vanadiumakkujen kehitystyö on alkanut jo 1970-luvulla ja on kokenut uuden nousun 2010-luvulla. Kehitystyö on kuitenkin vielä kesken, eikä kaupallisia vanadiumakkuja ole saatavilla. Muutama verkkoon kytketty suuren kokoluokan energiavarastojärjestelmä on käytössä muun muassa Japanissa, Kiinassa ja USA:ssa. Näistä suurin on Japanin Hokkaidossa, jossa Tomamae-tuulipuisto on kytketty 4 MW:n vanadiumakkujärjestelmään. Järjestelmä tasoittaa tuulipuiston tuotantohuippuja ja -notkoja. [22, s. 227–229, 235, 237]

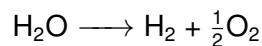
3.2 Vetyvarasto

Sähkön varastointi vetynä energiantuotannon yhteydessä tapahtuu 3 päävaiheessa. Ensiksi sähkön avulla tuotetaan vetyä. Sen jälkeen vety varastoidaan jollakin tavalla. Lopuksi vedyn avulla tuotetaan sähköä, joka voidaan syöttää sähköverkkoon.

Vedyn valmistustavoista tässä luvussa käsitellään elektrolyysiä, sillä sen avulla voidaan tuottaa vetyä suoraan aurinko- tai tuulisähköllä. Muita valmistustapoja ovat muun muassa fotolyysi ja reformointi [28, s. 391]. Lisäksi tarkastellaan erilaisten vedyn varastointitapojen sopivuutta hajautetun energiantuotannon yhteyteen. Toimintaperiaate-osion lopuksi tutustutaan sähkön tuottamiseen vedystä polttokennolla. Teknologian nykytilasta käsitellään vetyvaraston keskeisimmät nykyiset elektrolyysilaitteisto-, varasto- ja polttokennotyytit, käyttökohteet, sekä tulevaisuuden kehityssuunnat.

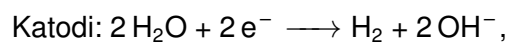
3.2.1 Toimintaperiaate

Elektrolyysissä vesi hajoaa vedyksi ja hapeksi sähkövirran vaikutuksesta kaavan

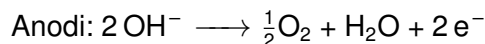


mukaisesti [29, s. 20]. Elektrolyysi voidaan toteuttaa erilaisilla elektrolyyiteillä muutamalla eri tavalla. Näitä ovat muun muassa alkalielektrolyysi, PEM-elektrolyysi (engl. proton exchange membrane) ja kiinteäoksidi-elektrolyysi [28, s. 391]. Näistä vanhin ja kaikkein käytetyin elektrolyysimuoto on alkalielektrolyysi, ja sen toimintaa esitellään tässä luvussa [22, s. 321]. Perusperiaate kaikilla elektrolyysimuodoilla on kuitenkin aina sama: vesi hajoaa sähkövirran vaikutuksesta vedyksi ja hapeksi.

Alkalielektrolyysissä katodilla ja anodilla reaktiot tapahtuvat reaktioyhtälöiden

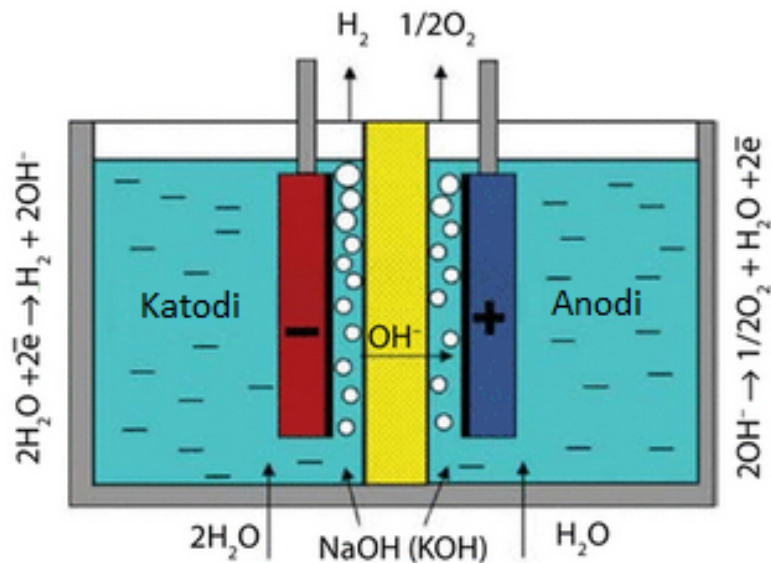


ja



mukaisesti [30, s. 241]. Vesi siis hajoaa katodilla sähkövirran vaikutuksesta vedyksi ja hydroksidi-ioneiksi. Anodilla hydroksidi-ioneista muodostuu vettä ja happikaasua. Alkalielektrolyysikennon toimintaa on havainnollistettu kuvassa 3.2. Elektrolyytinä toimii alkalielektrolyysissä joko NaOH- tai KOH-liuos.

Elektrolyysilaitteisto käyttää tasavirtaa. Tuulivoimalla tuotettu sähkö pitää siis muuttaa tasasähköksi tasasuuntaajalla. Aurinkovoimalla tuotettu sähkö on tasasähköä, joten sitä ei tarvitse muuttaa. Riippuen syöttävästä aurinkopaneelistä, elektrolyysilaitteisto saattaa vaatia kuitenkin akun tai DC/DC-muuntajan tasaamaan tuotannon vaihtelua ja muuttamaan jännitteen sopivaksi [31, s. 1]. On myös mahdollista optimoida elektrolyyseriä syöt-



Kuva 3.2. Alkalielektrolyysikennon toimintaperiaate [30, s. 244] mukailten

tävän aurinkopaneelin kennomäärää siten, että paneelin maksimitehopisteen virta ja jännite vastaavat elektrolyysin toimintajännitettä ja -virtaa. Tällöin elektrolyyseriä voidaan syöttää suoraan aurinkopaneelilla. [32, s. 5932].

Vetyä voidaan varastoida hajautetun energiantuotannon yhteydessä neljässä muodossa, joita ovat

- paineistettu kaasu
- jäähdytetty neste
- metallihydridi
- hiileen sidottu [33, s. 87].

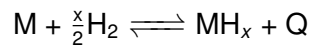
Vedystä voidaan lisäksi valmistaa esimerkiksi synteettisiä polttoaineita, mutta niitä ei tässä käsitellä.

Vetyä varastoidaan paineistettuna kompressoimalla sitä säiliöön 100–250 bar:n paineeseen [33, s. 89][34, s. 80]. Tarvittaessa painetta voidaan kasvattaa aina 600–700 bar:iin asti [33, s. 89]. Paineistus vaatii energiaa, ja vedyn paineistus 350–700 bar:n paineeseen kuluttaakin energiamäärän joka on verrannollinen 5–20 %:iin vedyn alemmasta lämpöarvosta [22, s. 328]. Jotta säiliöt kestävät painetta, niiden seinämien täytyy olla erittäin vahvoja. Tästä syystä säiliöt ovat myös erittäin painavia ja vedyn massaprosentti onkin koko säiliön painosta vain noin 1–7 %. [33, s. 88][34, s. 80]

Jos vety varastoidaan nesteytettynä, se jäähdytetään kiehumispisteen alapuolelle. Vedyn kiehumispiste on noin 20 K [34, s. 84]. Jäähdytysprosessiin käytetään Linden sykliä, jossa vetyä useaan kertaan paineistetaan, käytetään lämmönvaihtimessa, ja annetaan laajentua adiabaattisesti. Tällä tekniikalla varastoidun vedyn massaprosentti säiliössä on 16 %.

Jäähdytysprosessi kuluttaa 28 %:ia vedyn energiasisällöstä. [33, s. 91–92] Lisäksi vedyn pitäminen nesteytettynä vaatii vahvasti eristetyn säiliön sekä jatkuvaa jäähdytystä [22, s. 327]. Paineistettuun kaasuun verrattuna nesteytetyn vedyn energiatiheys on kuitenkin noin 3 kertaa suurempi [35, s. 133].

Kun vetyä varastoidaan kiinteänä metallihydridinä, vety H muodostaa sidoksia metallin tai metalliseoksen M kanssa kaavan



mukaisesti. Q kuvaa reaktiossa vapautunutta lämpö määrää, joka riippuu käytetystä metallista tai metalliseoksesta. Reaktio on reversiibeli, eli vastaavasti purkautumisvaiheessa hydridille on tuotava lämpö määrä Q . Hydridin muodostuminen tapahtuu tyypillisesti korkeassa ja purkautuminen matalassa paineessa. [34, s. 93–94] Matalan toimintalämpötilan (-50 – 200° C) hydrideille massaprosentti on varsin alhainen 1,5–1,9 %. Korkeamman massaprosentin omaavat hydridit vaativat sitä vastoin korkeamman toimintalämpötilan. [36, s. 2] Metallihydridisäiliöillä ei ole samanlaisia vaatimuksia kuin silloin, jos vety varastoidaan paineistettuna tai nesteytettynä. [34, s. 116]. Koska metallihydridit ovat kiinteitä, ei itsestäänpurkautuvuutta juurikaan esiinny.

Lisäksi vetyä voidaan varastoida fyysisesti hiileen sidottuna hiilen nanoputkissa, nanokuiduissa, fullereeneissa sekä grafeeneissa [34, s. 121]. Vedyn fyysinen sitoutuminen perustuu Van der Waalsin voimaan. Nanoputki on ikään kuin grafiittilevy, josta on muodostettu putki. [33, s. 101] Nanokuidut ovat sylinterinmuotoisia hiilimuodostelmia, jossa grafiittilevyt ovat järjestyneet esimerkiksi kartion muotoon [37, s. 64]. Fullereenit ovat esimerkiksi ellipsoidin tai pallon muotoisia hiilimuodostelmia. Grafeenit ovat yhden atomin paksuisia grafiittilevyjä. Näillä erilaisilla vedyn fyysiseen sitomiseen perustuvilla varastointimenetelmillä on saatu vedyn massaprosentiksi 1–5 %. [34, s. 124] Vedyn sitominen hiileen fyysisesti vaatii tyypillisesti alhaisen lämpötilan tai korkean paineen. Reaktio on reversiibeli ja vety voidaan vapauttaa nostamalla lämpötilaa tai laskemalla painetta. [38, s. 254]

Sopiva vedyn varastointitapa riippuu siitä, mihin varastoitua vetyä lopulta käytetään [22, s. 327]. Tällä hetkellä kaupallisia tapoja ovat varastointi paineistettuna kaasuna ja jäähdytettynä nesteinä. Jos vedystä tuotetaan sähköä polttokennolla, kannattaneesii vetyä varastoida hajautetun energiantuotannon yhteydessä paineistettuna kaasuna. Vedyn varastointipaine on hyödyllistä sovitaa loppukäyttöpaineeseen [22, s. 327]. Tällöin loppukäytössä ei esiintyne paineistuksesta aiheutuvia häviöitä.

Vedystä voidaan tuottaa sähköä polttokennolla. Polttokennossa vedyn on oltava kaasuna. Polttokennolla tapahtuvat reaktiot ovat vastakkaiset elektrolyysilaitteistolla tapahtuviin reaktioihin. Yleisiä polttokennotyyppejä ovat muun muassa alkalipolttokennot ja PEM-kennot. Polttokenno voi toimia myös reversiibelisti. Tällöin laite toimii sekä elektrolyysilaitteistona että polttokennona. Tällaisista systeemeistä käytetään nimitystä URFC (engl.

unitized regenerative fuel cell). [39, s. 136–137] Polttokenno tuottaa tasavirtaa, joten ennen verkkoon syöttämistä tasavirta on muutettava vaihtovirraksi vaihtosuuntaajalla. Lisäksi jännitetaso on muutettava sopivaksi muuntajalla.

3.2.2 Teknologian nykytila

Yleisimpiä elektrolyysimenetelmiä ovat alkalielektrolyysi ja PEM-elektrolyysi [40, s. 266]. Yleisimmät vedyn varastointimuodot ovat varastointi paineistettuna kaasuna ja jäähdytettynä nesteenä. Polttokennotyyppejä on monia erilaisia. Tässä alaluvussa käsitellään näiden komponenttien teknologian nykytilaa, sekä missä laajuudessa vetyvarastojärjestelmiä on käytetty.

Elektrolyysimenetelmät ovat jo varsin tunnettua teknologiaa. Kaupallisia elektrolyysimenetelmiä ovat alkalielektrolyysi, ja tätä nykyä myös PEM-elektrolyysi. Alkalielektrolyysi on kaikkein vanhin ja tunnetuin elektrolyysimuoto. Alkalielektrolyysin huono puoli on esimerkiksi alkaliumun muodostuminen. Alkalielektrolyysissä tuotettu vetyhöyry vaatii siis erillisen puhdistuksen, jos sitä halutaan varastoida tai käyttää polttokennossa. PEM-elektrolyysiin verrattuna siinä on kuitenkin halvemmat elektrodit. [30, s. 244] [28, s. 391] Alkalielektrolyysilaitteiston hyötysuhde on tyypillisesti 60–75 % [41, s. 312].

Toinen merkittävä ja lupaava elektrolyysimuoto on PEM-elektrolyysi [28, s. 392]. PEM-kennossa ei ole nestemäistä elektrolyyttiä, vaan kiinteä membraani mahdollistaa protonien liikkeen puolelta toiselle. Koska protonien vaikutuksesta membraani on erittäin hapan, anodilla ja katodilla joudutaan käyttämään jalometallikatalyyttejä. Katalyyttien takia PEM-elektrolyysilaitteisto on kallis alkalielektrolyysilaitteistoihin verrattuna. [29, s. 30][30, s. 253] Sen kehityskohde onkin katalyyttien käytön vähentäminen [28, s. 391–392]. PEM-elektrolyysi tuottaa erittäin puhdasta vetykaasua ja kuivatun kaasun vetypitoisuus on noin 99,99 % [30, s. 255]. Tämä täyttää esimerkiksi polttokennojen puhtausvaatimukset, eikä erillistä puhdistuslaitteistoa tarvita [42, s. 9842]. PEM-elektrolyysilaitteiston hyötysuhde on tyypillisesti 80–85 % [9, s. 945].

Vedyn varastointitavoista yleisimpiä ovat varastointi paineistettuna kaasuna ja jäähdytettynä nesteenä. Metallihydridinä varastointi on varsin lupaava mahdollisuus. Jotta metallihydridit pääsevät kunnolla kaupalliseen käyttöön, ne vaativat vielä lisätutkimusta. [34, s. 89, 115–116]. Vedyn varastointi fyysisesti hiileen sidottuna on varsin tuore ajatus, ja vaatii vielä paljon tutkimusta ennen kaupallistumista.

Paineistettu kaasu on kaikkein yleisin vedyn varastointimuoto [43, s. 98]. Sen haittapuolia ovat mahdollisuus vuotoihin sekä painavuus [44, s. 15075]. Uusia komposiittisäiliöitä ollaankin kehittämässä energiatihedden parantamiseksi [45, s. 588]. Paineistettua kaasua on käytetty elektrolyyseri–vetyvarasto–polttokenno-järjestelmissä muun muassa Norjan Utsirassa ja Yhdysvaltain Boulderissa. Näissä kohteissa polttokennojen rinnalla käytettiin

vetygeneraattoreita. [46, s. 3–5]

Nesteytettyä vetyä on käytetty erityisesti avaruusteknologiassa ja ajoneuvoissa korkean energiatiheytensä ansiosta. Nesteytetty vety on kuitenkin jäähdytystarpeensa takia kallis, ja sen käyttö on pääasiassa rajoittunut edellä mainittuihin applikaatioihin. [44, s. 15076] [34, s. 84] Nesteytetyn vedyn kehityskohteita ovatkin kryogeenisten säiliöiden kehittäminen ja jäähdytysprosessin hinnan ja energiahäviöiden alentaminen [34, s. 84].

Metallihydridejä on alettu kehittämään vedyn varastointiin vasta 2010-luvulla [47, s. 7781]. Varastointimuotona metallihydridejä on käytetty erityisesti sukellusveneissä [47, s. 7794]. Elektrolyyseri–metallihydridivarasto–polttokenno-yhdistelmiä on testattu useassa kohteessa, mutta kaupallisessa käytössä niitä ei juurikaan ole [47, s. 7783–7784]. Tällaisista kaupallisista järjestelmistä mainittakoon Toshibaan vuonna 2016 lanseeraama järjestelmä, joka sisältää 62 kW:n aurinkopaneelijärjestelmän, akuston, elektrolyysilaitteiston, metallihydridivaraston sekä 54 kW:n polttokennon. [47, s. 7783–7784, 7794] Metallihydrideihin perustuvat vedyn varastointijärjestelmät ovat siis pääosin vielä kehityksessä.

Vedyn fyysiseen sitomiseen perustuvat varastointimenetelmät vaativat vielä paljon tutkimusta. Erilaisilla nanostruktuureilla on todettu varsin hyviä massaprosentteja. Sekä kokeellista että teoreettista tutkimusta tarvitaan kuitenkin lisää, jotta fyysiseen sitomiseen perustuvat varastointimenetelmät pääsisivät kaupalliseen käyttöön. [34, s. 124, 135]

Polttokennojen kehitys on varsin pitkällä, ja niitä on kehitetty useita eri tyyppisiä. Varteenotettavin kennotyyppi tällä hetkellä lienee PEM-kenno [34, s. 160]. Esimerkiksi alkalipolttokennoon verrattuna PEM-kennon etu on vaarallisten nesteiden puuttuminen [41, s. 69–70]. PEM-kennoja käytetäänkin erityisesti ajoneuvosovelluksissa [34, s. 169]. Esimerkiksi polttokennomootorin hyötysuhteen on todettu olevan noin 3 kertaa tavallista bensiinimootoria parempi [34, s. 153]. PEM-kennon hyötysuhteen oheislaitteineen arvioidaan olevan noin 35–50 % [9, s. 946][48, s. 55].

3.3 Vauhtipyörä

Sähköenergiajärjestelmissä vauhtipyörän käyttäminen energiavarastona perustuu sähköenergian ja liike-energian välisiin energiamuunnoksiin. Vauhtipyörä on esimerkiksi metallista tai komposiitista valmistettu pyöreä kiekko, jonka pyörimisnopeutta kiihdyttämällä tai hidastamalla voidaan sähköenergiaa muuttaa liike-energiaksi tai liike-energiaa sähköenergiaksi.

Tässä luvussa käsitellään vauhtipyörä-energiavaraston toimintaperiaate sekä teknologian nykytila. Toimintaperiaate-osiossa tutustutaan vauhtipyöräjärjestelmän sitoutuvan energiamäärään, vauhtipyöräjärjestelmän häviöihin, vauhtipyöräjärjestelmän osiin sekä näiden vaikutuksiin edellä mainittuihin asioihin. Teknologian nykytilasta käsitellään vauhtipyöräjärjestelmien keskeisimmät nykyiset käyttökohteet, sekä tulevaisuuden kehityssuun-

nat.

3.3.1 Toimintaperiaate

Vauhtipyörä-energiavarastossa sähköenergia varastoidaan vauhtipyörän liike-energiaksi. Kun sähköenergiaa halutaan syöttää verkkoon, vauhtipyörän liike-energiaa muutetaan sähköenergiaksi. Vauhtipyörään varastoituneen energian määrä on kaavan

$$E_k = \frac{1}{2} I_m \omega_f^2 \quad (3.1)$$

mukainen [23, s. 6]. ω_f on vauhtipyörän kulmanopeus. Kaavassa I_m on vauhtipyörän hitausmomentti, joka yksittäiselle kappaleelle määritellään kaavan

$$I_m = \int x^2 dm \quad (3.2)$$

mukaisesti. Kaavassa x on on yksittäisen pisteen etäisyys keskipisteestä, ja dm tiheysjakauma. Hitausmomentti on siis riippuvainen vauhtipyörän muotoilusta ja massasta.

Vauhtipyöräjärjestelmän osia ovat

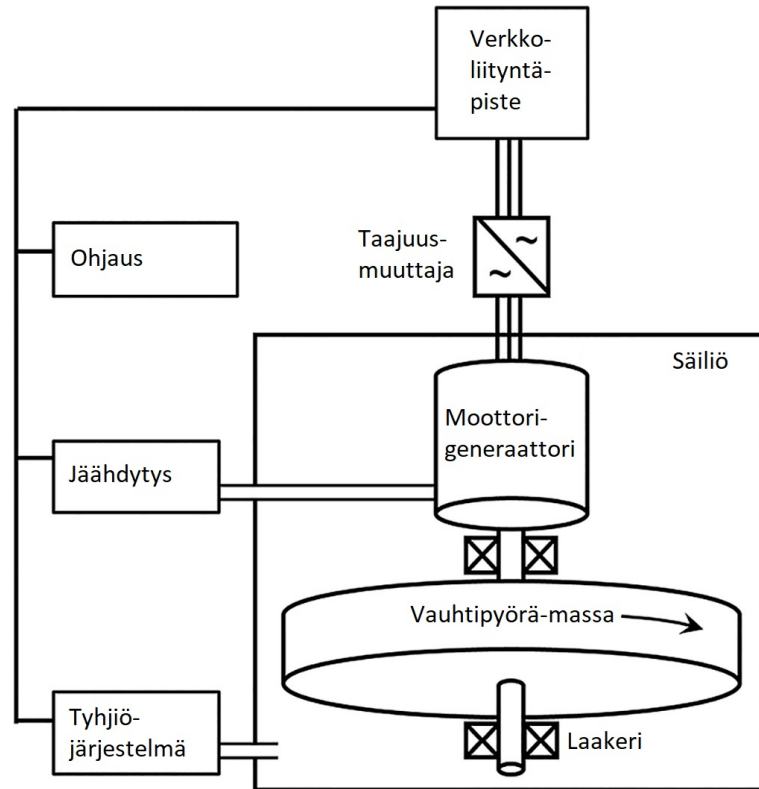
- vauhtipyörä
- moottori–generaattori-järjestelmä
- laakerointi
- tyhjiöpumppu
- tehoelektroniikkajärjestelmä
- ulkoiset kelat. [49, s. 101–105]

Vauhtipyöräjärjestelmän kokoonpanoa on havainnollistettu kuvassa 3.3.

Vauhtipyörä valmistetaan tyypillisesti teräksestä tai komposiitista [51, s. 600]. Maksimi energianvarastointikapasiteetti vauhtipyörälle saadaan sellaisessa materiaalissa, jonka massatiheys on pieni ja vetolujuus suuri [52, s. 82]. Vauhtipyörän muoto voi olla esimerkiksi litteä kiekko, reunoille oheneva ja pyöristetty kiekko, ohut vanne tai sauva [48, s. 67].

Vauhtipyöräjärjestelmässä sähköenergian ja liike-energian väliset muutokset tapahtuvat sähkömoottori–generaattori-yhdistelmän kautta. Kun energiaa varastoidaan vauhtipyörään, sähkömoottori–generaattori-järjestelmä toimii moottorina ja pyörittää vauhtipyörää. Kun taas vauhtipyörän liike-energiasta tuotetaan sähköä, yhdistelmä toimii generaattorina. [22, s. 515–516] Tyypillisiä vauhtipyöräjärjestelmissä käytettyjä sähkökoneita ovat induktiokoneet, reluktanssikoneet sekä kestopagneettikoneet [49, s. 103].

Vauhtipyörän laakerit voivat olla joko mekaanisia tai magneettisia [49, s. 104]. Mekaaniset



Kuva 3.3. Vauhtipyöräjärjestelmä [50, s. 1120] mukaillen

laakerit ovat niin sanotusti perinteisiä laakereita. Magneettilaakereissa laakerin ja akselin välillä ei ole kontaktia, koska magneetin muodostama magneettikenttä saa akselin levi-toimaan [53, s. 1]. Magneettiset laakerit voivat olla joko passiivisia, aktiivisia tai suprajoh-tavia. Passiiviset magneettilaakerit käyttävät kestmagneetteja, mutta epästabiilisuuden vuoksi ne vaativat tuekseen mekaanisia laakereita. Aktiiviset magneettilaakerit säättävät magneettikenttiä sensorien avulla. [54, s. 6808] Suprajohtavia magneettilaakereita käyt-tämällä vauhtipyörän häviöt vähenevät, sillä suprajohteissa tapahtuvat resistiiviset häviöt ovat erittäin pienet [48, s. 68][55, s. 930]. Tähän ilmiöön perehdytään tarkemmin luvus-sa 3.4.1. Suprajohtavat laakerit vaativat kuitenkin jatkuvaa jäähdytystä suprajohtavuuden säilyttämiseksi [55, s. 930].

Vauhtipyörää käytetään säiliössä jonka paine on $10^{-1} - 10^{-5}$ Pa. Tällainen paine saadaan aikaan tyhjiöpumpulla. [22, s. 516] Tehoelektroniikkajärjestelmällä säädetään taajuutta ja ohjataan moottori-generaattori-järjestelmän toimintaa. Ulkoisilla keloilla estetään vauhtipyöräjärjestelmän harmonista vääristymää energian varastointivaiheessa. [49, s. 104–105]

Vauhtipyörän häviöt aiheutuvat pääasiassa vauhtipyörään kohdistuvasta ilmanvastukses-ta ja laakeroinnin kitkahäviöistä [52, s. 87]. Ilmanvastusta pienennetään aiemmin maini-tuilla tyhjiöpumpuilla. Pienessä paineessa vauhtipyörään kohdistuva ilman kitka, ja sitä kautta ilmanvastus, on pienempi. [22, s. 516]. Laakeroinnin kitkahäviöitä voidaan vähen-tää aiemmin mainituilla magneettilaakereilla [55, s. 930]. Näiden häviöiden takia vauhti-

pyöräjärjestelmän hyötysuhde laskee ajan kuluessa, ja se sopiikin paremmin lyhyen ajan (sekunneista tunteihin) energiavarastoksi [52, s. 87–88]. Vauhtipyörä saattaa menettää koko energiasisältönsä noin päivässä [56, s. 66]. Lataus–purkaus-hyötysuhde vauhtipyöräjärjestelmälle on arviolta 70–80 % [57, s. 244].

3.3.2 Teknologian nykytila

Vauhtipyöriä on käytetty jo pidemmän aikaa erityisesti ajoneuvokäytöissä, mutta sähköenergiajärjestelmissä ne ovat varsin uusi asia [58, s. 481–482]. Tavallisimpia sähköenergian varastointiin liittyviä tehtäviä ovat taajuuden ja jännitteen säätely ja kulutuksen tasaaminen. Lisäksi vauhtipyöriä on käytetty varavoimajärjestelminä. [59, s. 10]

Kuormituksen tasaamiseen vauhtipyöräjärjestelmiä on käytetty esimerkiksi Australian Coral Baylla, jonne asennettiin vuonna 2007 500 kW:n järjestelmä. Alueen energiantuotanto koostui 7:stä 320 kW:n matalan kuorman dieselgeneraattorista ja 3:sta 200 kW:n tuulivoimalasta. Vauhtipyöräjärjestelmän ansiosta tuulivoimalla tuotettiin parhaimpina hetkinä 95 % koko alueen energiantuotannosta. Järjestelmä mahdollisti sen, että kolmasosan vuodesta tuulivoimalla tuotetaan 80 % koko alueen energiantuotannosta. [59, s. 11]

Taajuudenhallintaan vauhtipyöräjärjestelmiä on asennettu esimerkiksi New Yorkin Stepentowniin. 20 MW:n järjestelmä koostuu 200 vauhtipyörästä, josta kunkin teho on 100 kW. Lyhyiden jännitekuoppien (yleensä noin 20–50 ms) hallintaan vauhtipyöräjärjestelmiä on käytetty muun muassa Portugalissa Flores Islandilla. 500 kW:n järjestelmä pystyy säilyttämään jännitteen tarvittaessa 60 sekuntia. Järjestelmä on edelleen käytössä. [59, s. 11–12]

Vauhtipyöriä voidaan käyttää myös lyhyen ajan (muutaman sekunnin) varavoimajärjestelmänä. 97 % sähkökatkoista kestää alle 3 s, joten vauhtipyöräjärjestelmät ovat tähän tarkoitukseen erittäin sopivia. [54, s. 6807] Pidempiaikaiseen energian varastointiin vauhtipyöriä on käytetty yhdessä akkujen kanssa. Vauhtipyörillä pystytään vähentämään akkujen toistuvaa purkautumista ja latausta, mikä pidentää niiden elinikää. Pienempiä, ilman akkuja toimivia varavoimajärjestelmiä on käytetty muun muassa Yhdysvaltojen Texasissa. Esimerkiksi Austin Energyn kontrollikeskus on varustettu 4,8 MW:n vauhtipyöräjärjestelmällä. [59, s. 13]

Tulevaisuuden kehityskohteita ovat muun muassa laminoidusta teräksestä valmistetut vauhtipyörät, jotka parantavat suurien kierrosnopeusten omaavien vauhtipyörien turvallisuutta verrattuna komposiittivauhtipyöriin [59, s. 16]. Lisäksi pyritään kehittämään tekniikoita, joilla vauhtipyörien ominaisenergiaa saadaan kasvatettua [48, s. 75]. Kehitystyö kohdistuu myös erityisesti suprajohtaviin magneettilaakereihin [60, s. 302]. Suprajohtavien magneettilaakerien kehityksellä saadaan vauhtipyörän resistiivisiä häviöitä pienennettyä. Tämä parantaa vauhtipyörän kokonaishyötysuhdetta erityisesti, jos energiaa

varastoidaan pidemmän aikaa. Suprajohtavien magneettilaakerien kehitystyö lieneekin avainasemassa, mikäli vauhtipyörää aiotaan käyttää energiavarastona hajautetussa energiantuotannossa.

Vauhtipyörä on nykyisellään toimiva vaihtoehto esimerkiksi taajuudensäätöön ja lyhytaikaiseen energian varastointiin. Vauhtipyörän ehdottomia vahvuuksia ovat erittäin pitkä käyttöikä (satoja tuhansia täysiä lataus–purkaus-syklejä) sekä päästöttömyys [22, s. 516] [61, s. 397]. Vauhtipyörän haittapuolia ovat korkea hinta ja suuret häviöt, jotka johtavat lyhyeen varastointiaikaan [23, s. 5]. Hajautetun energiantuotannon yhteydessä vauhtipyörillä saattaa olla rooli tuotannon tasauksessa ja taajuuden säädössä, mutta ei niinkään pitkäaikaisena energiavarastona.

3.4 SMES

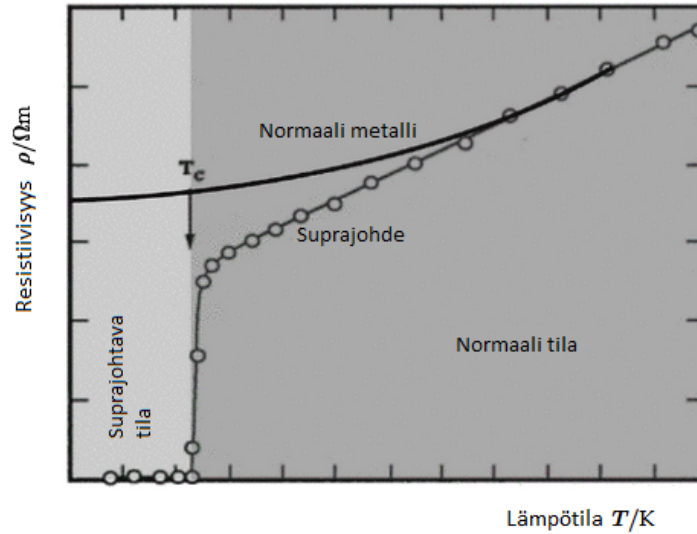
Suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston eli SMESin (engl. superconducting magnetic energy storage) toiminta perustuu sähköenergian varastointiin magneettikenttään. SMESin toiminnan mahdollistaa sähköinen ominaisuus, suprajohtavuus.

Tässä luvussa käsitellään SMESin toimintaperiaatetta ja teknologian nykytilaa. Ensiksi esitellään suprajohtavuuden perusteet ja SMESin rakenne. Lisäksi analysoidaan SMESin hyötyjä ja haittoja. Teknologian nykytilaa käsitellään paneutumalla erilaisten SMESien teknologian kypsytyteen ja kehityskohteisiin. Lopuksi tutustutaan siihen, missä kaikkialla SMESejä on käytetty.

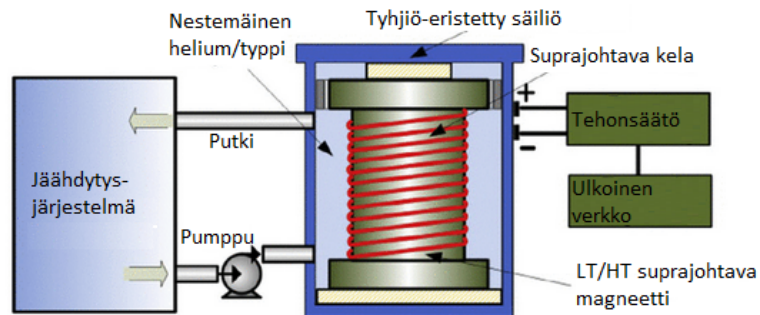
3.4.1 Toimintaperiaate

SMESin toiminta perustuu suprajohtavuuteen. Suprajohtavuus tarkoittaa sitä, että jonkin aineen tai yhdisteen resistiivisyys katoaa, kun ainetta jäähdytetään tietyn lämpötilan alapuolelle. Suprajohteen resistiivisyyden muutosta lämpötilan funktiona verrattuna tavalliseen johteeseen on havainnollistettu kuvassa 3.4. [62, s. 394] Kriittisen lämpötilan T_c jälkeen suprajohtavan materiaalin resistiivisyys katoaa. Virta pystyy siis teoriassa kulkemaan suprajohteessa rajattoman ajan. Esimerkki suprajohtavasta materiaalista on niobitina-yhdiste. Niobi-tinan jäähdytykseen käytetään esimerkiksi nestemäistä heliumia tai typpeä. [38, s. 587]

SMESin rakennetta on havainnollistettu kuvassa 3.5. SMES sisältää jäähdytysjärjestelmän, tyhjiöeristetyn säiliön, suprajohtavan käämin ja tehonsäätöyksikön. Jäähdytysjärjestelmä kierrättää nestemäistä typpeä tai heliumia tyhjiöeristetystä säiliöstä. [38, s. 587] Tehonsäätöyksikkö sisältää verkkokatkaisijan, ohjauselektronikan ja tasa- ja vaihtosuuntaajat [48, s. 77]. SMES suuntaa esimerkiksi tuulivoimalla tuotetun vaihtovirran tasavirraksi tehonsäätöyksikössä tasasuuntaajalla, jonka jälkeen virta jää kiertämään suprajohtavassa käämissä. Jäähdytysjärjestelmän avulla kela pidetään suprajohtavassa tilassa.



Kuva 3.4. Suprajohtavan aineen resistiivisyys lämpötilan funktiona [62, s. 394] mukailten



Kuva 3.5. SMESin rakenne [38, s. 587] mukailten

[38, s. 587]. Kun energiaa halutaan taas syöttää verkkoon, suprajohtavassa käämissä kiertänyt tasavirta suunnataan tehonsäätöyksikössä vaihtovirraksi vaihtosuuntaajalla [63, s. 88].

SMESiin varastoitu energia tallettuu käämissä kiertävän tasavirran synnyttämään magneettikenttään. Varastoituneen energian määrä voidaan laskea kaavan 3.3

$$E_{\text{SMES}} = \frac{1}{2} LI^2 \quad (3.3)$$

mukaisesti. Kaavassa L on käämin induktanssi, ja I kelassa kulkeva virta.

SMESissä tapahtuvat häviöt aiheutuvat pääasiassa jäähdytyksestä ja suuntauksesta. [64, s. 516, 519] Suuntauksen hyötysuhde per suuntaus on noin 95 % [38, s. 588]. Jäähdytyksestä aiheutuvat häviöt riippuvat energian varastointiajasta. Lataus–purkaus-hyötysuhteen arvioidaan käytännössä olevan noin 95 % [64, s. 516]. Vuorokauden mittaiselle varastointiajalle kokonaishyötysuhteen arvioidaan olevan tyypillisesti noin 90 % [57, s. 241]. SMESin itsepurkautuvuus on arviolta noin 10–15 % päivässä [65, s. 521].

SMESin suurin etu on nopea tehonsyöttö. Teho on lähes välittömästi saatavilla, sillä SME-Sin käynnistysaika on vain noin 5 ms. [64, s. 516][57, s. 241] SMESin muita etuja ovat muun muassa pitkä elinikä ja hyvä hyötysuhde. SMESin haittoja ovat alhainen energiatiheys, kallis hinta sekä voimakkaasta magneettikentästä mahdollisesti aiheutuvat terveys-haitat. [61, s. 419]

3.4.2 Teknologian nykytila

SMESit voidaan jaotella matalan lämpötilan ja korkean lämpötilan järjestelmiin. Näistä käytetään jatkossa nimityksiä LTS ja HTS (engl. Low Temperature SMES ja High Temperature SMES). LTS:n toimintalämpötila on noin 7 K, ja HTS:n 70 K. [63, s. 89] Esimerkki LTS:ssä käytettävästä supraohdemateriaalista on niobi-titaani, ja HTS:ssä vismuttipohjainen kuparioksidikeraami [48, s. 76]. HTS-suprajohteiden materiaalit ovat tyypillisesti erilaisia keraameja [57, s. 241].

Kaupallistuneet järjestelmät ovat pääasiassa pienitehoisia (alle 10 MW:n) LTS:iä [38, s. 588][57, s. 241]. Suurempitehoiset järjestelmät ja HTS:t eivät ole vielä kaupallistuneet [48, s. 76, 78]. Pieniä, energianvarastointimäärältään kJ-tason LTS:iä on asennettu muun muassa Intiaan ja Saksaan. Myös pieniä HTS:iä on kehitteillä esimerkiksi Ranskassa ja Etelä-Koreassa. Suurempia, MJ-tason järjestelmiä on kehitteillä muun muassa Yhdysvaltoihin ja Japaniin. Tämän kokoluokan SMESit ovat pääasiassa LTS:iä. Suuret GJ-tason SMESit ovat vielä harvinaisia. Niitä on kehitetty vain Yhdysvaltoihin ja Japaniin, joista Yhdysvalloissa on LTS- ja Japanissa HTS-järjestelmä. [66, s. 68]

Ensimmäiset kaupallistuneet SMESit ovat jo 1980-luvulta, jolloin US Bonneville Power Administration asennutti 10 MW:n järjestelmän. Järjestelmä pystyi varastoimaan 30 MJ (8,3 kWh), ja vapauttamaan 10 MJ (2,8 kWh) energiaa sekunnin kolmasosassa. Järjestelmää käytettiin tehonsäätöön. [57, s. 242] Yksi viimeisimmistä asennetuista SMESeistä on Kiinaan rakennettu 100 kJ:n (27,8 Wh) HTS. Järjestelmää käytettiin tehonsäätöön 25 MW:n piеноisverkossa. [66, s. 69]

SMESien tämän hetken kehityskohteita ovat materiaalien kehitys sekä suprajohtavan käämin hinnan saaminen halvemmaksi [38, s. 588]. Erityisesti tekniikoita ollaan kehittämässä HTS-materiaalien käsittelyn helpottamiseksi. SMESeissä jäähdytys on edelleen iso osa häviöitä, ja HTS:ien kehittyminen tullee lisäämään SMESien taloudellista kiinnostavuutta. [57, s. 241]

4. ENERGIAVARASTOJEN TUNNUSLUKUJEN VERTAILU

Tässä luvussa tarkastellaan energiavarastojen kokonaishyötysuhdetta eli varaston purusta saatavan energiamäärän suhdetta varaston lataukseen vaadittavaan energiamäärän. Hyötysuhdelaskelmissa otetaan mahdollisuuksien mukaan huomioon kaikki häviöt. Lisäksi tarkastellaan energiavarastojen kustannuksia. Lopuksi vertaillaan energiavarastojen ominaisuuksia toisiinsa.

Kuten luvussa 2 todettiin, erityisesti tuulivoiman lisääntyvä osuus aiheuttaa tarpeen sähköenergian varastoinnille. Tuulivoimatuotannon ja tuulivoimalan keskiarvoteho on karkeasti arvioituna noin 1/3 nimellistehosta. Tuulivoimatuotanto saattaa olla pitkiäkin aikoja tämän keskiarvotehon alapuolella, tyypillisimmin kuitenkin 2–3 päivää. [6] Näiden oletusten perusteella mietitään sopivat parametrit laskelmille.

Lasketaan energiavarastojen hyötysuhteet esimerkkiyöimalalle. Otetaan esimerkkiyöimalaksi 3 MW:n tuulivoimala. Energiavaraston tehon on oltava tuulivoimalan keskiarvoteho, eli 1 MW. Oletetaan tuulivoimalan tehon olevan 0,5 MW kun energiavarastoa puretaan. Jaetaan energiavarastot käyttötarkoitukseltaan pitkä- ja lyhytaikaisiin energiavarastoihin. Pitkäaikaisia energiavarastoja ovat akku ja vetyvarasto. Lyhytaikaisia energiavarastoja ovat vauhtipyörä ja SMES. Oletetaan pitkäaikaisen energiavaraston varastointiajaksi 3 pv, ja lyhytaikaisen energiavaraston varastointiajaksi 1 h.

Energiavaraston varastointikapasiteetti voidaan laskea kaavan

$$E = Pt \quad (4.1)$$

mukaisesti. Teho P on energiavaraston tehon ja tuulivoimalan tehon erotus (1 MW – 0,5 MW = 0,5 MW). t vaihtelee sen mukaan, lasketaanko varastointikapasiteetti lyhyt- vai pitkäaikaiselle energiavarastolle. Pitkäaikaiselle energiavarastolle varastointikapasiteetti on kaavan 4.1 avulla laskettuna 36 MWh. Lyhytaikaiselle energiavarastolle varastointikapasiteetti on kaavan 4.1 avulla laskettuna 500 kWh.

Yleisesti hyötysuhde voidaan laskea kertomalla kunkin varastointivaiheen hyötysuhteet keskenään kaavan

$$\eta_{kok} = \eta_1 * \eta_2 * \eta_3 \dots \quad (4.2)$$

mukaisesti. Energiavaraston kustannukset lasketaan joko tehon tai varastointikapasitee-

tille arvioidun hinnan mukaan, hieman energiavarastosta riippuen. Tuulivoimalan tuottama sähkö on vaihtosähköä, joten tämä on huomioitava hyötysuhteen määrittämisessä.

4.1 Akku

Akun hyötysuhde koostuu suuntaajien hyötysuhteesta, akun itsestäänpurkautuvuudesta sekä lataus–purkaus-hyötysuhteesta. Tuulivoimalla tuotettu sähkö on tasasuunnattava ennen akun latausta. Ennen verkkoon syöttöä akusta purettu sähkö on vaihtosuunnattava. Suuntauksen hyötysuhde on 95 % per suuntaus. Lasketaan hyötysuhde nyt litiumioniakulle, jolla on tarkastelemistamme akuista pienin itsestäänpurkautuvuus 1 % per kuukausi. Itsestäänpurkautuvuus 3 päivässä on tämän avulla laskettuna 0,1 %. Lataus–purkaus-hyötysuhde litiumioniakulle on välillä 85–95 %. Kaavan 4.2 avulla laskettuna litiumioniakun hyötysuhde 3 päivän varastointiajalle on välillä 76,6–85,7 %.

Akkujen hinnan määräävä tekijä on esimerkkitapauksessamme varastointikapasiteetti. Litiumioniakulle hallintajärjestelmineen hinnan arvioidaan olevan $400 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. [67, s. 21] 36 MWh:n kapasiteetille akuston hinta on arviolta 14,4 milj. €. Litiumioniakkujen eliniäksi arvioidaan 10 000 lataus–purkaus-sykliä [67, s. 48].

4.2 Vetyvarasto

Vetyvaraston hyötysuhde koostuu tarvittajien suuntaajien, elektrolyysilaitteiston, vetyvaraston ja polttokennon hyötysuhteesta. Vedyn varastointimuotona käytetään tässä laskelmassa paineistettua kaasua. Suuntauksen hyötysuhde on 95 % per suuntaus. Lasketaan vetyvaraston hyötysuhde PEM-teknologiaan nojautuvalle elektrolyysilaitteistolle ja polttokennolle. Elektrolyysilaitteiston hyötysuhde on tyypillisesti 80–85 %. PEM-kennolle oheislaitteineen hyötysuhteen arvioidaan olevan noin 35–50 %. Vedyn varastoinnin hyötysuhde on arviolta 87–89 % [44, s. 15075].

Vetyvaraston kokonaishyötysuhde kaavan 4.2 avulla laskettuna on välillä 22,0–34,1 %. Vetyvaraston hyötysuhde on siis varsin alhainen verrattuna akkujen hyötysuhteeseen. Kirjallisuudessa esiintyvät arviot vetyvaraston hyötysuhteesta ovat välillä 20–50 % [63, s. 91][23, s. 15].

Vetyvaraston hinnan määräävä tekijä on esimerkkitapauksessamme varastointikapasiteetti. Vetyvaraston hinnaksi on arvioitu $100 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. [67, s. 48] 36 MWh:n vetyvaraston hinta on arviolta 3,6 milj. €. Vetyvaraston eliniäksi on arvioitu 10000 h [67, s. 48].

4.3 Vauhtipyörä

Vauhtipyöräjärjestelmän hyötysuhde koostuu pääasiassa laakeroinnissa aiheutuvista kitkahäviöistä sekä vauhtipyörän ilmanvastuksesta. Lataus–purkaus-hyötysuhteen arvioitiin

olevan 70–80 %. Luvussa 3 arvioitiin vauhtipyörän menettävän koko energiasisältönsä päivässä. Lyhytaikaiselle energiavarastolle varastointiajaksi päätettiin 1 h. Tällöin vauhtipyörän itsestäänpurkautuvuus on $\frac{1}{24} = 0,042 = 4,2\%$.

Vauhtipyöräjärjestelmän kokonaishyötysuhde yhden tunnin lyhytaikaisena energiavarastona on kaavan 4.2 avulla laskettuna välillä 67,1–76,6 %. Jos laakeroinnissa käytetään suprajohtavia magneettilaakereita, resistiiviset häviöt ovat pienempiä, mutta jäähditys aiheuttaa häviöitä.

Vauhtipyöräjärjestelmän kustannukset ovat noin 500–1000 $\frac{\$}{kWh}$ [57, s. 244]. 500 kWh:n varastointikapasiteetille vauhtipyöräjärjestelmän hinta on välillä 250 000 - 500 000 \$. Tämän hetken kurssin pohjalta (01.04.2021, 1 \$ = 0,85 €), tämä tekee 212 500 – 425 000 €. Vauhtipyöräjärjestelmän eliniäksi arvioidaan 300 000 lataus–purkaus-sykliä [67, s. 48].

4.4 SMES

SMESin hyötysuhde koostuu suuntaajissa aiheutuvista häviöistä, sekä suprajohtavien magneettien jäähdityshäviöistä. Suuntauksen hyötysuhde on 95 % per suuntaus. Itsestäänpurkautuvuuden arvioitiin olevan noin 10–15 % päivässä. Tunnissa se on siis noin 0,42–0,63 %. SMESin lataus–purkaus-hyötysuhde on noin 95 %.

SMESille kokonaishyötysuhde 1 tunnin varastointiajalle on kaavan 4.2 avulla laskettuna 85,2–85,4 %. Kokonaishyötysuhde on siis erittäin hyvä, mutta siinä ei ole otettu huomioon jäähdytyksestä aiheutuvia häviöitä. Jäähdytyksestä aiheutuvien häviöiden takia SMES ei sopine kovin pitkäaikaiseen energian varastointiin, ja niitä käytetäänkin tyypillisesti minuiteista tunteihin kestävään energian varastointiin esimerkiksi tehonsäädössä [23, s. 15].

Esimerkkivoimalamme tapauksessa teho tai varastointikapasiteetti ei kumpikaan ole erityisesti hintaa määrittävä tekijä. Laskettiinpa kustannusarvio vaadittavan tehon tai varastointikapasiteetin avulla ovat molemmat kustannusarviot samaa suuruusluokkaa. Varastointikapasiteetin perusteella laskettuna SMESin kustannusten arvioidaan olevan $1000 \frac{\text{€}}{kWh}$ [67, s. 48]. Kustannukset 500 kWh:n kapasiteetille ovat noin 500 000 €. SMESin eliniäksi arvioidaan 500 000 lataus–purkaus-sykliä [67, s. 48].

4.5 Vertailu

Taulukkoon 4.1 on koottu energiavarastojen hyötysuhteet ja kustannukset. Akun ja vetyvaraston hyötysuhde ja kustannukset on laskettu 1 MW:n teholla ja 3 pv:n varastointiajalla. Vauhtipyörän ja SMESin hyötysuhde ja kustannukset on laskettu 1 MW:n teholla ja 1 h:n varastointiajalla.

Taulukko 4.1. Energiavarastojen hyötysuhteet ja kustannukset

	Akku	Vetyvarasto	Vauhtipyörä	SMES
Hyötysuhde	76,6–85,7 %	22,0–34,1 %	67,1–76,6 %	85,2–85,4 %
Kustannukset	14,4 milj. €	3,6 milj. €	0,213–0,425 milj. €	0,5 milj. €
Elinikä	10 000 sykliä	10 000 h	300 000 sykliä	500 000 sykliä

Litiumioniakun hyötysuhde on varsin hyvä. Ainakaan tästä syystä akkujen käytölle energiavarastona ei ole estettä. Kustannukset ovat kuitenkin erittäin suuret, kun ottaa huomioon että tuulivoimalan hinta on noin 1,2–1,5 milj. $\frac{\text{€}}{\text{MW}}$ [68]. Esimerkkivoimalamme hinta olisi siis noin 3,4–4,5 milj. €. Jos akkujen kustannuksia ei saada alhaisemmiksi, akkujen käyttöä suurten energiamäärien varastointiin ei tultane näkemään isossa määrässä.

Akkujen elinikä on varsin pieni verrattuna vauhtipyörän tai SMESin elinikään. Koska akku ei kestä niin montaa lataus–purkaus-sykliä, sitä kannattanee käyttää pidempiä aikoja kerrallaan, esimerkiksi tehonsäätöön. Jos akku ladataan ja puretaan esimerkiksi 3 kertaa päivässä, sen elinaika olisi 10000 syklin eliniällä noin 9 vuotta. Tähän vaikuttavat kuitenkin monet muutkin asiat, esimerkiksi miten suuri osuus akusta kerrallaan puretaan ja missä lämpötilassa akkua käytetään. Akun todellinen elinaika on siis hankala määrittää, mutta tällä hetkellä kustannukset jäävät pidemmälläkin elinajalla erittäin korkeiksi.

Vetyvaraston kustannukset ovat pienemmät kuin akuilla, mutta hyötysuhde on merkittävästi huonompi. Saman energiamäärän varastointiin tarvittaisiin siis huomattavasti isompi varastointikapasiteetti kuin akuilla. Akkuihin verrattuna vedyn varastointikapasiteettiä voitaneen kuitenkin kasvattaa tilavuusyksikköä kohden suhteellisen halvalla esimerkiksi rakentamalla kerralla isompia säiliöitä.

Vetyvaraston eliniäksi arvioitiin käytössä noin 10 000 h. Esimerkiksi 3 h päivittäisessä käytössä elinaika olisi tällöin noin 9 vuotta. Elinajaksi on toisessa lähteessä arvioitu 5–15 vuotta [23, s. 15]. Näin mittaville investoinnille tällainen elinaika lienee liian lyhyt. Vetyvaraston kokonaishyötysuhteen on parannettava ja elinajan pidennyttävä, jotta vetyvarastoja kannattaisi käyttää energiavarastona hajautetun energiantuotannon yhteydessä.

Vauhtipyöräjärjestelmän hyötysuhde on suhteellisen heikko ottaen huomioon, että varastointiaika on vain 1 h. Hyötysuhde on lähes 20 prosenttiyksikköä pienempi kuin toisella lyhyen aikavälin energiavarastolla, SMESillä. Huonosta hyötysuhteesta huolimatta, vauhtipyörien lyhyen vasteajan ansiosta ne sopivat paremmin lyhyen aikavälin energiavarastoksi kuin akku tai vetyvarasto. Jotta vauhtipyörää voitaisiin käyttää pidemmän aikavälin energiavarastona, vauhtipyörän itsestäänpurkautuvuutta pitäisi saada merkittävästi paremmaksi. Vauhtipyörän kertakustannukset ovat merkittävästi pienemmät kuin SMESillä.

Vauhtipyörän elinikä on varsin korkea, 300 000 sykliä. Tämä mahdollistaa päivittäisessä käytössä useita kymmeniä lataus–purkaus-syklejä usean vuoden ajan. Kuten kappalees-

sa 3 mainittiin, vauhtipyöriä onkin käytetty vähentämään varavoimajärjestelmissä lyhyillä sähkökatkoilla akkujen turhaa purkamista. Vauhtipyörän elinikä on kuitenkin huomattavasti lyhyempi kuin SMESillä. Lataus–purkaus-sykliä kohden vauhtipyörän kustannukset ovat välillä 0,71–1,42 €.

SMESin hyötysuhde on suhteellisen hyvä, ja merkittävästi parempi kuin vauhtipyörillä. Hyötysuhteessa ei ole kuitenkaan huomioitu jäähtymisen aiheuttamia häviöitä. SMES on kertakustannuksiltaan vauhtipyörää kalliimpi. Lisäksi SMESin vaatima jatkuva jäähtyminen aiheuttaa kustannuksia. Tämä täytyy ottaa huomioon SMESin taloudellista kannattavuutta mietittäessä. SMES sopinee hyvin sellaisen energiamuodon yhteyteen, jossa muutenkin käytetään hyödyksi suprajohtavuutta, esimerkiksi jos suprajohteita käytetään tuulivoimalan generaattorissa.

SMESin elinikä on 500 000 sykliä. Tämä mahdollistaa vauhtipyörän tavoin useita kymmeniä lataus–purkaus-syklejä päivässä usean vuoden ajan. Yhtä lataus–purkaus-sykliä kohden SMESin kustannukset ovat 1 €. SMESin kustannukset sykliä kohden saattavat olla siis vähemmän kuin vauhtipyöräjärjestelmällä. SMES on tämän takia varsin kilpailukykyinen energiavarastovaihtoehto lyhyellä energian varastointiajalla.

Kaiken kaikkiaan, tuloksista voidaan nähdä, että sähköenergian varastoiminen ei todellakaan ole halpaa tai helppoa. Erityisesti muualla maailmassa, jossa uusiutuvia energialähteitä on jo laajemmin käytössä kuin Suomessa, energiavarastoille on kuitenkin selkeä tarve. Jottei energiantuotantoa tarvitsisi rajoittaa, voi ylijäämänsähköön varastointi olla taloudellisesti järkevä vaihtoehto. Suomessa tähän on kuitenkin vielä matkaa, sillä Suomeen tuodaan jatkuvasti sähköä erityisesti Ruotsista ja Venäjältä. Jos Olkiluoto 3 pääsee aloittamaan toimintansa helmikuussa 2022, voi ylijäämänsähköön varastoinnille Suomessakin tulla tarvetta [69]. Vaikka energiavarastojen kustannukset ovat varsin mittavia, erityisesti saarekekäytössä tai varavoimajärjestelminä energiavarastojen käyttö kannattaa, sillä sähkökatkosta aiheutuvat kustannukset voivat olla erittäin suuret.

Näistä varastointiteknologioista henkilökohtaisesti ajattelen vetyvaraston olevan kaikkein lupaavin vaihtoehto suuren mittaluokan toimintaan, sillä sen varastointikapasiteettia voitaneen kasvattaa suhteellisen halvalla tilavuusyksikköä kohti. Samantapaisia ajatuksia on myös EU:n ja Suomen tasolla, sillä Suomi aikoo käyttää EU:n jakamasta elvytysrahastosta merkittäviä summia vetytalouden edistämiseen [70].

5. YHTEENVETO

Säädettävä sähköntuotanto tulee vähentymään tulevaisuudessa EU:n ilmastopolitiikan vaikutuksesta. EU:n päästökauppasääntely tulee nostamaan energiantuotannossa fossiilisten polttoaineiden käytön kustannuksia ja tulee lopulta tekemään sen kannattamattomaksi. Lisäksi EU:n ilmastotavoitteisiin sisältyy uusiutuvan energiantuotannon osuuden nostaminen energiantuotannossa. Tämä toisaalta lisää sähköntuotannon säätelyn tarvetta. Erityisesti tuulivoima on lisääntynyt Suomessa lähivuosina merkittävästi.

Ratkaisuna näihin säätelyongelmiin voisivat olla energiavarastot. Tässä työssä tarkasteltavia energiavarastoja olivat akku, vetyvarasto, vauhtipyörä ja SMES. Pitkäaikaiseen energian varastointiin sopivia energiavarastoja ovat akku ja vetyvarasto. Näitä energiavarastoja voitaisiin käyttää jopa päiviä kestäväan energian varastointiin. Pitkäaikaisten energiavarastojen hyötysuhdetta ja kustannuksia arvioitiin 1 MW:n teholla ja 36 MWh:n kapasiteetilla. Akkujen hyötysuhde on varsin hyvä (n. 77–86 %), mutta suuren varastointikapasiteetin kustannukset ovat merkittävät (n. 14,4 milj. €). Vetyvaraston hyötysuhde on sitä vastoin heikko (n. 22–34 %). Kustannukset varastointikapasiteetille ovat kuitenkin huomattavasti akkuja pienemmät, ja varastointikapasiteettia voitaneen kasvattaa akkuihin verrattuna halvalla. Vetyvaraston kustannukset ovat arviolta 3,6 milj. €.

Lyhytaikaiseen energian varastointiin sopivia energiavarastoja ovat vauhtipyörä ja SMES. Niille tyyppillinen energian varastointiaika on sekunneista tunteihin. Lyhytaikaisten energiavarastojen hyötysuhdetta ja kustannuksia arvioitiin 1 MW:n teholla ja 500 kWh:n kapasiteetilla. Vauhtipyörän hyötysuhde on välillä 67–77 %. Vauhtipyörän kustannukset jäivät SMESin kustannuksia alhaisemmiksi. Vauhtipyörän kustannukset olivat arviolta noin 0,2–0,4 milj. €, kun taas SMESin kustannukset olivat arviolta noin 0,5 milj. €. SMESin hyötysuhde oli vauhtipyörän hyötysuhdetta merkittävästi parempi, noin 85 %. Siinä ei kuitenkaan oltu arvioitu SMESin jäähdtyksestä aiheutuvia häviöitä.

Uskon, että tulevaisuudessa energiavarastot tulevat olemaan merkittävässä roolissa hajautetun energiantuotannon yhteydessä. Olkiluoto 3:n valmistuessa tälle herää Suomesakin isompi tarve. Akkuteknologiaa on jo käytetty erityisesti pienimuotoisessa energian varastoinnissa aurinkovoimaloiden yhteydessä, ja sillä on teknologian kypsyyden kannalta etulyöntiasema vetyyn nähden. Teknologian kehittyessä ajattelen kuitenkin, että vedyllä tulee olemaan merkittävämpi rooli pitkäaikaisena energiavarastona. Vauhtipyöriä ja SME-

Sejä on jo käytetty lyhytaikaisena energiavarastona esimerkiksi tehonsäätöön, ja siihen niitä tullaan todennäköisesti käyttämään myös hajautetun energiantuotannon yhteydessä. Niillä on vielä merkittäviä kehitysaskelia otettavana, jotta ne voisivat joskus operoida pidempiä aikoja hyvällä hyötysuhteella.

LÄHTEET

- [1] Ympäristöministeriö. *Euroopan Unionin ilmastopolitiikka*. [viitattu 25.03.2021]. URL: <https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka>.
- [2] Ympäristöministeriö. *Suomen kansallinen ilmastopolitiikka*. [viitattu 25.03.2021]. URL: <https://ym.fi/suomen-kansallinen-ilmastopolitiikka>.
- [3] Fingrid. *Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito*. [viitattu 19.02.2021]. URL: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>.
- [4] Fingrid. *Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat*. [viitattu 25.03.2021]. URL: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/#saatosahkon-hinnoittelu>.
- [5] Energiategollisuus. *Energiavuosi 2020*. [viitattu 25.03.2021]. URL: https://energia.fi/files/4428/Sahkovuosi_2020_netti.pdf.
- [6] Fingrid. *Tuulivoimatuotanto Suomessa, vuosi 2020*. [viitattu 19.02.2021]. URL: https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected_datasets=181.
- [7] Akorede, M. F., Hizam, H. ja Poursmaeil, E. Distributed energy resources and benefits to the environment. *Renewable & sustainable energy reviews* 14.2 (2010). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002561>.
- [8] Jenkins, N., Ekanayake, J. B. ja Strbac, G. *Distributed Generation*. Institution of Engineering ja Technology, 2010. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDG000002/distributed-generation-2/distributed-generation-2>.
- [9] Luque, A. ja Hegedus, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHPSEE002/handbook-photovoltaic/handbook-photovoltaic>.
- [10] Zhao, Bo, Wang, Caisheng, Zhang ja Xuesong. *Grid-Integrated and Standalone Photovoltaic Distributed Generation Systems - Analysis, Design, and Control*. John Wiley & Sons, 2018. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGISPDGS3/grid-integrated-standalone/grid-integrated-standalone>.
- [11] Motiva. *Auringonsäteilyn määrä Suomessa*. [viitattu 19.02.2021]. URL: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkon_perusteet/auringonsateilyn_maara_suomessa.
- [12] Fingrid. *Tunnettainen sähkönkulutus Suomessa, vuosi 2020*. [viitattu 19.02.2021]. URL: https://data.fingrid.fi/open-data-forms/search/fi/?selected_datasets=124.

- [13] Bangash, K. N., Farrag, M. E. A. ja Osman, A. H. Investigation of Energy Storage Batteries in Stability Enforcement of Low Inertia Active Distribution Network. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy* 4.1 (2019). URL: <https://libproxy.tuni.fi/login?url=https://www-proquest-com.libproxy.tuni.fi/scholarly-journals/investigation-energy-storage-batteries-stability/docview/2331786237/se-2?accountid=14242>.
- [14] Godula-Jopek, A. ja Stolten, D. *Hydrogen Production: By Electrolysis*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2015. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1956440>.
- [15] King, G. C., Forshaw, J., Gleeson, H. ja Loebinger, F. *Physics of Energy Sources*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017. URL: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4827456>.
- [16] Shepherd, W. ja Zhang, L. *Electricity Generation Using Wind Power*. World Scientific, 2011. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpEGUWP002/electricity-generation/electricity-generation>.
- [17] Tuuliatlas. *Tuulisuus Suomessa*. [viitattu 19.02.2021]. URL: <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>.
- [18] Crompton, T. P. J. *Battery Reference Book (3rd Edition)*. Elsevier, 2000. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpBRBE0001/battery-reference-book/battery-reference-book>.
- [19] Vargel, C., Germain, J.-M. ja Dunlop, H. *Corrosion of Aluminium (2nd Edition)*. Elsevier, 2020. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpCAE00002/corrosion-aluminium-2nd/corrosion-aluminium-2nd>.
- [20] Divya, K. C. ja Østergaard, J. Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research* 79.4 (2009). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0378779608002642>.
- [21] May, G. J., Davidson, A. ja Monahov, B. Lead batteries for utility energy storage: A review. *Journal of Energy Storage* 15 (2018). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X17304437>.
- [22] Letcher, T. M. *Storing Energy - With Special Reference to Renewable Energy Sources*. Elsevier, 2016. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSEWSRREP/storing-energy-with-special/storing-energy-with-special>.
- [23] Berrada, A. ja Loudiyi, K. *Gravity Energy Storage*. Elsevier, 2019. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpGES00006/gravity-energy-storage/gravity-energy-storage>.
- [24] Menictas, C., Skyllas-Kazacos, M. ja Lim, T. M. *Advances in Batteries for Medium- and Large-Scale Energy Storage*. Elsevier, 2015. URL: <https://app.knovel.com>.

- com/hotlink/toc/id:kpABMLSES1/advances-in-batteries/advances-in-batteries.
- [25] Chen, T., Jin, Y., Lv, H., Yang, A., Liu, M., Chen, B., Xie, Y. ja Chen, Q. Applications of lithium-ion batteries in grid-scale energy storage systems. *Transactions of Tianjin University* 26.3 (2020).
- [26] Subburaj, A. S., Kondur, P., Bayne, S. B., Giesselmann, M. G. ja Harral, M. A. Analysis and Review of Grid Connected Battery in Wind Applications. - *2014 Sixth Annual IEEE Green Technologies Conference* (2014).
- [27] Liao, Q., Sun, B., Liu, Y., Sun, J. ja Zhou, G. A techno-economic analysis on NaS battery energy storage system supporting peak shaving. *International Journal of Energy Research* 40.2 (2016).
- [28] Chi, J. ja Yu, H. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. *Chinese Journal of Catalysis* 39.3 (2018). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1872206717629498>.
- [29] Millet, P. ja Grigoriev, S. *Renewable Hydrogen Technologies*. Toim. L. M. Gandía, G. Arzamendi ja P. M. Diéguez. Elsevier, 2013. URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/B9780444563521000027>.
- [30] Sankir, M. ja Sankir, N. D. *Hydrogen Production Technologies*. John Wiley & Sons, 2017. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHPT00001/hydrogen-production-technologies/hydrogen-production-technologies>.
- [31] Sun, Z., Wang, G., Koh, S. W., Ge, J., Zhao, H., Hong, W., Fei, J., Zhao, Y., Gao, P., Miao, H. ja Li, H. Solar-Driven Alkaline Water Electrolysis with Multifunctional Catalysts. *Advanced Functional Materials* 30.27 (2020). URL: <https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1002/adfm.202002138>.
- [32] Gibson, T. L. ja Kelly, N. A. Optimization of solar powered hydrogen production using photovoltaic electrolysis devices. *International Journal of Hydrogen Energy* 33.21 (2008). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360319908006526>.
- [33] Calise, F., D'Accadia, M. D., Santarelli, M., Lanzini, A. ja Ferrero, D. *Solar Hydrogen Production - Processes, Systems and Technologies*. Elsevier, 2019. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSHPPST01/solar-hydrogen-production/solar-hydrogen-production>.
- [34] Zhang, J. Z., Li, J., Li, Y. ja Zhao, Y. *Hydrogen Generation, Storage, and Utilization*. John Wiley & Sons, 2014. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHGSU000V/hydrogen-generation-storage/hydrogen-generation-storage>.
- [35] Ren, J., Wang, Y. ja He, C. *Towards Sustainable Chemical Processes - Applications of Sustainability Assessment and Analysis, Design and Optimization, and Hybridization and Modularization*. Elsevier, 2020. URL: <https://app.knovel.com/>

- hotlink/toc/id:kpTSCPASA5/towards-sustainable-chemical/towards-sustainable-chemical.
- [36] Tarasov, B. P., Fursikov, P. V., Volodin, A. A., Bocharnikov, M. S., Shimkus, Y. Y., Kashin, A. M., Yartys, V. A., Chidziva, S., Pasupathi, S. ja Lototskyy, M. V. Metal hydride hydrogen storage and compression systems for energy storage technologies. *International Journal of Hydrogen Energy* (2020). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360319920326604>.
- [37] Wang, H. ja Fokwa, B. P. T. *Inorganic Battery Materials*. John Wiley & Sons, 2020. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIBM0000T/inorganic-battery-materials/inorganic-battery-materials>.
- [38] Brun, K., Allison, T. ja Dennis, R. *Thermal, Mechanical, and Hybrid Chemical Energy Storage Systems*. Elsevier, 2021. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTMHCESS1/thermal-mechanical-hybrid/thermal-mechanical-hybrid>.
- [39] Hester, R. E. ja Harrison, R. M. *Energy Storage Options and Their Environmental Impact*. Royal Society of Chemistry, 2019. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpES0TEI0A/energy-storage-options/energy-storage-options>.
- [40] Gautam, M., Rao, K. V. S. ja Saxena, B. K. Selection of electrolyzer-fuel cell combination for supply of water and electricity in remote areas. - *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)* (2017).
- [41] Dicks, A. L. ja Rand, D. A. J. *Fuel Cell Systems Explained (3rd Edition)*. John Wiley & Sons, 2018. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFCSEE01P/fuel-cell-systems-explained/fuel-cell-systems-explained>.
- [42] Kovač, A., Marciuš, D. ja Budin, L. Solar hydrogen production via alkaline water electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy* 44.20 (2019). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360319918335286>.
- [43] Godula-Jopek, A., Jehle, W. ja Wellnitz, J. *Hydrogen storage technologies new materials, transport, and infrastructure*. 2. painos. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2012. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=966171>.
- [44] Abe, J. O., Popoola, A. P. I., Ajenifuja, E. ja Popoola, O. M. Hydrogen energy, economy and storage: Review and recommendation. *International Journal of Hydrogen Energy* 44.29 (2019). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S036031991931465X>.
- [45] Sørensen, B. *Renewable Energy - Physics, Engineering, Environmental Impacts, Economics and Planning (4th Edition)*. Elsevier, 2011. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpREPEEIE2/renewable-energy-physics/renewable-energy-physics>.

- [46] Widera, B. Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. *Thermal Science and Engineering Progress* 16 (2020). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904919302628>.
- [47] Colbe, J. B. von, Ares, J.-R., Barale, J., Baricco, M., Buckley, C., Capurso, G., Gallandat, N., Grant, D. M., Guzik, M. N., Jacob, I., Jensen, E. H., Jensen, T., Jepsen, J., Klassen, T., Lototsky, M. V., Manickam, K., Montone, A., Puszkiel, J., Sartori, S., Sheppard, D. A., Stuart, A., Walker, G., Webb, C. J., Yang, H., Yartys, V., Züttel, A. ja Dornheim, M. Application of hydrides in hydrogen storage and compression: Achievements, outlook and perspectives. *International Journal of Hydrogen Energy* 44.15 (2019). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0360319919302368>.
- [48] Alanen, R., Koljonen, T., Hukari, S. ja Saari, P. Energian varastoinnin nykytila. VTT (2003). URL: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>.
- [49] Arabkoohsar, A. *Mechanical Energy Storage Technologies*. Elsevier, 2021. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMEST0001/mechanical-energy-storage/mechanical-energy-storage>.
- [50] Wicki, S. ja Hansen, E. G. Clean energy storage technology in the making: An innovation systems perspective on flywheel energy storage. *Journal of Cleaner Production* 162 (2017). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0959652617310764>.
- [51] Liu, H. ja Jiang, J. Flywheel energy storage—An upswing technology for energy sustainability. *Energy and Buildings* 39.5 (2007). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0378778806002350>.
- [52] Ter-Gazarian, A. *Energy Storage for Power Systems (3rd Edition)*. Institution of Engineering ja Technology, 2020. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpESPSE013/energy-storage-power/energy-storage-power>.
- [53] Maruo, E., Komori, M., Asami, K. ja Sakai, N. Basic Study on Superconducting Magnetic Bearing (SMB) With Superconducting Coil. - *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 22.3 (2012).
- [54] Sebastián, R. ja Alzola, R. P. Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.9 (2012). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1364032112004777>.
- [55] Andrade, R. de, Ferreira, A. C., Sotelo, G. G., Suemitsu, W. I., Rolim, L. G. B., Neto, J. L. S., Neves, M. A., Santos, V. A. dos, Costa, G. C. da, Rosario, M., Stephan, R. ja Nicolisky, R. A superconducting high-speed flywheel energy storage system. *Physica C: Superconductivity* 408-410 (2004). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S092145340400574X>.

- [56] Kaldellis, J. K. *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems - Technology, Energy Storage and Applications*. Woodhead Publishing, 2010. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSAHWESTH/stand-alone-hybrid-wind/stand-alone-hybrid-wind>.
- [57] Breeze, P. *Power Generation Technologies (3rd Edition)*. Elsevier, 2019. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPGTE001C/power-generation-technologies/power-generation-technologies>.
- [58] G, S. M., Faraji, F., Majazi, A. ja Al-Haddad, K. A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67 (2017). URL: <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1364032116305597>.
- [59] Amiryar, M. E. ja Pullen, K. R. A Review of Flywheel Energy Storage System Technologies and Their Applications. *Applied Sciences (2076-3417)* 7.3 (2017). URL: <http://libproxy.tuni.fi/login?url=https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&AuthType=cookie,ip,uid&db=aci&AN=122032639&site=ehost-live&scope=site>.
- [60] Zito, R. ja Ardebili, H. *Energy Storage - A New Approach (2nd Edition)*. John Wiley & Sons, 2019. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpESANAE08/energy-storage-new-approach/energy-storage-new-approach>.
- [61] Sallam, A. A. ja Malik, O. P. *Power System Stability - Modelling, Analysis and Control*. Institution of Engineering ja Technology, 2015. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpPSSMAC06/power-system-stability/power-system-stability>.
- [62] Schmool, D. S. *Solid State Physics - From the Material Properties of Solids to Nanotechnologies*. Mercury Learning ja Information, 2017. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSSPFMPS6/solid-state-physics-from/solid-state-physics-from>.
- [63] Chauhan, R. K., Chauhan, K. ja Singh, S. N. *Microgrids for Rural Areas - Research and Case Studies*. Institution of Engineering ja Technology, 2020. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpMRARCS02/microgrids-rural-areas/microgrids-rural-areas>.
- [64] Belu, R. *Industrial Power Systems with Distributed and Embedded Generation*. Institution of Engineering ja Technology, 2019. URL: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpIPSDEG02/industrial-power-systems/industrial-power-systems>.
- [65] Luo, X., Wang, J., Dooner, M. ja Clarke, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy* 137 (2015). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>.

- [66] Mukherjee, P. ja Rao, V. V. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications - A review. *Physica C: Superconductivity and its Applications* 563 (2019). URL: <https://www-sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0921453419301066>.
- [67] Korpela, A. Suuren kokoluokan energianvarastointiteknologioiden teknis-taloudelliset näkymät. *Tampereen ammattikorkeakoulu* (2018). URL: <https://julkaisut.tamk.fi/PDF-tiedostot-web/B/113-Suuren-kokoluokan-energiavarastointitekno-tekni-s-taloudelliset-nakymat.pdf>.
- [68] Tuulivoimayhdistys. *Investoinnit*. [viitattu 24.03.2021]. URL: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/taloudellisuus/investoinnit>.
- [69] YLE Uutiset, T. P. *Olkiluoto kolmoselle viimein aikataulu: säännöllinen sähköntuotanto alkaa helmikuussa vuonna 2022*. [viitattu 25.03.2021]. URL: <https://yle.fi/uutiset/3-11516011>.
- [70] YLE Uutiset, A. P. *Suomesta uusiutuvan energian mallimaa? Kokonainen vetytalous aiotaan herättää henkiin EU:n elvytysmiljardeilla*. [viitattu 25.03.2021]. URL: <https://yle.fi/uutiset/3-11838445>.