

Emma Tuominen

TUULISÄHKÖN VARASTOINTIMAHDOL- LISUUDET AKKUIHIN

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Seppo Syrjälä
5/2022

TIIVISTELMÄ

Emma Tuominen: Tuulisähkön varastointimahdollisuudet akkuihin
Wind energy storage in battery
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tekniikan ja luonnontieteiden TkK-tutkinto-ohjelma, ympäristö- ja energiatekniikka
Toukokuu 2022

Tuulisähkö on yleistynyt muiden uusiutuvien energialähteiden tapaan ilmaston muutoksen hillitsemisen vuoksi. Tuulisähkön tuotannon ollessa epävarmaa tuulen vaihtelevuuden vuoksi on tuulisähkönvarastointia pyritty kehittämään. Akkuenergiavarastot ovat yksi varastointivaihtoehto, joka voitaisiin yhdistää tuulivoimaloihin.

Tuulivoimalan toiminta perustuu energian muuttamiseen muodosta toiseen. Tuulen kineettinen energia muuttuu roottorin mekaaniseksi energiaksi tuulen pyörittäessä roottoria. Roottori on yhdistetty generaattoriin, jolloin roottorin pyöriessä mekaaninen energia muuttuu sähköenergiaksi, joka siirretään tuulivoimalasta sähköverkkoon. Tuulivoimalan teho on riippuvainen tuulen voimakkuudesta.

Energian varastointikeinoja on monenlaisia, esimerkiksi akut, vauhtipyörät, vety sekä paineil-mavarastot. Akkujen toiminta energiavarastona perustuu sähköenergian muuttamiseen akun kemialliseksi energiaksi. Akku koostuu sähkökemiallisista kenoista, jotka yhdistetty toisiinsa joko rinnan- tai sarjaan kytkettyjä. Sähkökemiallisten kennojen välillä virtaa elektroneja, jotka aiheuttavat akkuun jännitteen.

Tuulivoimalaan yhdistetty akkuvarasto eli BESS (Battery Energy Storage System) vaikuttaa lupaavalta vaihtoehdolta tuulisähkönvarastointiin. Tuulivoimalan tuottama sähkö voidaan siirtää joko suoraan sähköverkkoon tai akkuun sähkön kulutuksen mukaan. Akku on yhdistetty sähköverkkoon kaksisuuntaisen muuntajan kautta, jossa virta voi kulkea kumpaankin suuntaan.

Tuulivoimalan ja BESS:n toimintaa voidaan optimoida ja säätää ohjausjärjestelmien avulla. Niitä ovat esimerkiksi tuulivoiman suodatus, tuulen voimakkuuden ennustaminen sekä akun lataukseen ja purkaukseen perustuva ohjausjärjestelmä. Lisäksi toimintaa voi ohjata sähkön hinnan mukaan.

BESS on lupaava ratkaisu tuulivoiman varastointiin, koska se on energiatehokas, helppo asentaa ja myös sen energiatiheys on suuri. Toisaalta sen haasteina on suuret kustannukset. Kustannukset voivat kuitenkin pienentyä akkuteknologioiden kehittyessä sekä ohjausjärjestelmiä käyttämällä.

Suomessa tällaisia tuulivoimaloihin yhdistettyjä suuria akkuvarastoja on vasta yksi. Se sijaitsee Iin Viinämäen tuulipuistossa. Helen on investoinut toiseen samaan tyyppiseen laitokseen, joka on rakenteilla Pohjanmaalle.

Se, yleistyvätkö tuulivoimaloihin yhdistetyt akut tulevaisuudessa, riippuu akkujen hintojen kehityksestä, poliittisista päätöksistä sekä yleisestä maailman tilanteesta. Esimerkiksi päästökauppa sekä Euroopan Unionin ja Suomen päätökset uusiutuvien energialähteiden lisäämiseksi tukevat yleistymistä.

Avainsanat: energian varastointi, tuulisähkö, BESS

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

| | |
|--|----|
| 1. JOHDANTO | 1 |
| 2. TUULISÄHKÖ | 2 |
| 2.1 Tuulen vaihtelevuus ja tuulivoimalan sijoittaminen | 2 |
| 2.2 Tuulivoimalat | 3 |
| 3. ENERGIAN VARASTOINTIMENETELMÄT | 6 |
| 3.1 Energian varastointi | 6 |
| 3.2 Akut | 6 |
| 3.3 Muita energian varastointikeinoja | 7 |
| 4. AKKUJEN KÄYTTÖ TUULISÄHKÖN VARASTOINNISSA | 8 |
| 4.1 BESS ja sen toiminta | 8 |
| 4.2 BESS:n materiaalit | 9 |
| 4.3 Pätötehon ja loistehon hallinta | 10 |
| 4.4 Ohjausjärjestelmät | 11 |
| 4.5 BESS:n vahvuudet ja heikkoudet | 13 |
| 4.6 Akkujen käyttö tuulivoiman varastoinnissa Suomessa | 14 |
| 5. JOHTOPÄÄTÖKSET | 15 |
| LÄHDELUETTELO | 17 |

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi uusiutuvalla energialla korvataan fossiilisia polttoaineita. Euroopan unionin tavoitteena on, että vuonna 2030 uusiutuvan energian osuus energian kokonaisloppukulutuksesta on 32 %, ja Suomen vastaava tavoite on 51 %. Uusiutuvien energialähteiden käyttöä lisätään, jotta kasvihuonepäästöjä pystytään vähentämään. Tällä hetkellä Suomen sähköstä noin 10 % on tuulisähköä. [1] Tuulisähkö on riippuvainen sääolosuhteista, koska tuulen voimakkuus vaihtelee vuorokauden ja vuodenajan mukaan [2]. Sähköntarve voi kuitenkin olla suuri tuulen ollessa tyyni ja päinvas-toin. Tämän vuoksi on tärkeää kehittää sähkön varastointimahdollisuuksia.

Tämä kandidaatintyö on rajattu käsittelemään tuulienergian varastointia akuissa. Tavoitteena on selvittää akkujen vahvuudet ja heikkoudet tuulisähkön varastoinnissa. Tätä varten selvitetään mahdollisia akkutekniikoita sekä niiden erilaisia ominaisuuksia. Lisäksi selvitetään ohjausjärjestelmien käyttöä ja etuja, kun tuulienergiaa varastoidaan akkuihin. Näiden asioiden perusteella pyritään selvittämään tämän tekniikan mahdollisuuksia yleistyä. Lisäksi tavoitteena on tutkia tuulivoimaloihin yhdistettyjen akkuvarastojen nykyistä tilannetta sekä tulevaisuuden näkymiä ja niiden käytön lisääntymistä Suomessa.

Vaikka uusiutuvana energialähteenä tuulivoima on hyvä ratkaisu ilmastolle, sekä tuulivoimalan että akkujen kierrättämisessä on vaikeuksia. Tuulivoimalan lavat on valmistettu lasikuitumuovista ja muista materiaaleista, joiden erottaminen toisistaan on hankalaa, jolloin myös niiden kierrättäminen vaikeutuu. Lisäksi tuulivoimaloissa on paljon arvokkaita metalleja, jotka pitää saada talteen. [3] Tuulivoimalan kierrättämisen lisäksi myös akkujen kierrätys on hankalaa. Akuissa käytetään tärkeitä metalleja ja mineraaleja, joiden kierrätys olisi tärkeää. Akkujen kierrätys ei kuitenkaan vielä ole tehokasta ja materiaaleja menee hukkaan. [4] Tässä kandidaatin työssä ei kuitenkaan perehdytä näiden materiaalien kierrättämiseen.

Aluksi kirjallisuuskatsauksessa käydään läpi tuulivoiman perusteita sekä erilaisia energian varastointitapoja lyhyesti. Näiden jälkeen perehdytään akkujen mahdollisuuksiin ja etuihin sekä niiden heikkouksiin tuulisähkön varastoinnissa. Johtopäätösluvussa tavoitteena on saada käsitys siitä, millaiset tulevaisuuden näkymät akuilla on tuulisähkön varastoinnissa.

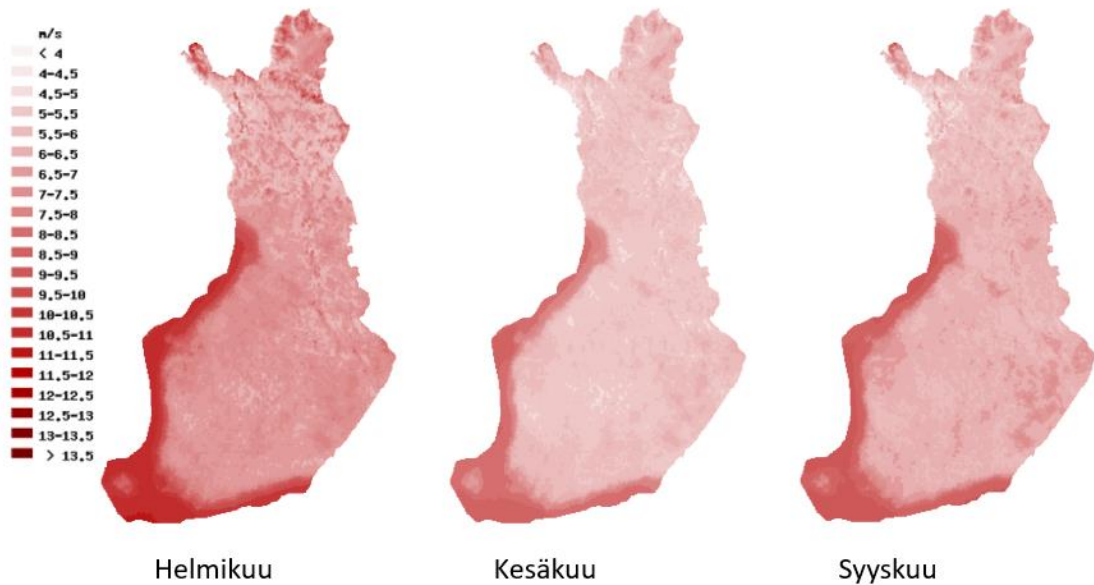
2. TUULISÄHKÖ

Luvun 2 tavoitteena on saada käsitys tuulivoiman perusteista. Luvussa 2.1 perehdytään tuulen syntyyn vaikuttaviin seikkoihin. Lisäksi selvitetään maantieteellisen sijainnin sekä korkeuden vaikutusta tuulen voimakkuuteen. Luvussa 2.2 käsitellään perinteisen tuulivoimalan toimintaa sekä sen komponentteja. Luvussa käsitellään myös tuulivoimaloiden määrää Suomessa ja tuulienergiatuotannon kasvua viime vuosina.

2.1 Tuulen vaihtelevuus ja tuulivoimalan sijoittaminen

Tuuli syntyy ilmassa olevien paine-erojen seurauksena, jotka syntyvät lämpötilaerojen seurauksena. Lämmin ilma on kevyttä ja kohoaa ylöspäin, jolloin kylmä ilma virtaa lämpimämmän ilman paikalle. Suuret paine-erot ja ilmavirrat syntyvät eri ilmastoalueiden välillä. Trooppiset ilmastoalueet ovat lämpimämpiä, joten ilma virtaa niistä niiden viereisiin kylmempiin ilmastoalueihin. Näin syntyy suuri ilmamassa, joka virtaa päiväntasaajalta navoille aiheuttaen voimakkaan tuulen. [5, s. 17–22]

Matalissa korkeuksissa tuuleen kohdistuu kitka, joka vastustaa tuulen liikettä ja samalla hidastaa nopeutta. Tuulen keskinopeus on suurempi korkeammalla, joten pienikin tuulivoimalan napakorkeuden muutos voi lisätä tehoa huomattavasti. Tuulen voimakkuus vaihtelee vuosittain, kuukausittain sekä päivittäin. Eri vuosien välillä tuulen keskinopeus voi vaihdella jopa 2–3 metriä sekunnissa. Lisäksi tuulen nopeus vaihtelee paljon eri kausien välillä. Kuvassa 1 on esitetty tuulen keskinopeus Suomessa helmi-, kesä- ja syyskuussa. Talvisin tuulen keskinopeus on suurin ja kesäisin pienin. Vuorokausien välillä tuulen voimakkuus voi vaihdella paljonkin. Tuulen vaihtelevuuden vuoksi myös tuulivoimaloiden tuotanto on hyvin vaihtelevaa. [2] Sen vuoksi tuulivoimaa tasaamaan tarvitaan säätövoimaa eli esimerkiksi vesivoimaa tai energian varastointiteknologioita. [6,7]



Kuva 1. Tuulen keskinopeuksien suuruudet helmi-, kesä- ja syyskuussa perustuu lähteeseen [2]

Rannikkoalueet ovat hyviä sijoituspaikkoja tuulivoimaloille. Kuvasta 1 huomataan tuulen keskinopeuden olevan huomattavasti suurempi rannikolla kuin sisämaassa. Tästä huolimatta myös sisämaasta löytyy hyviä sijoituskohteita tuulivoimaloille, joiden lisäksi hyviä paikkoja voisivat olla merialueet ja tunturit. Merialueille onkin suunnitteilla suuren kokoluokan voimaloita. [6]

Tuulen nopeuden on oltava yli 3 m/s, jotta tuulivoimala käynnistyy. Tuulivoimala toimii nimellistehollaan, kun tuulen nopeus on 10–15 m/s, ja se pysähtyy tuulen nopeuden noustessa liian suureksi. [6] Tuulen nopeuden lisäksi tuulivoimalan tehoon vaikuttavat myös ilman tiheys sekä lapojen pyyhkäisy-pinta-ala. [5, s. 24–31]

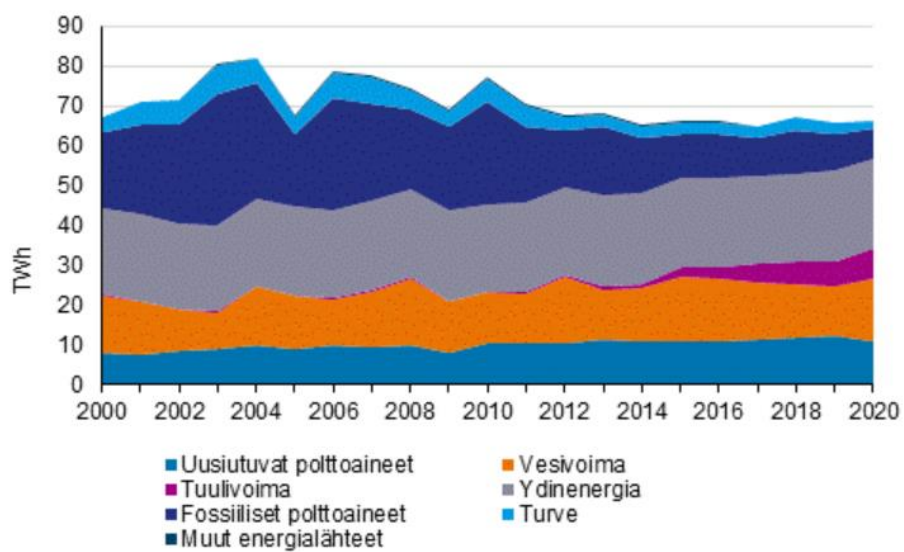
2.2 Tuulivoimalat

Tavallisesti tuulivoimalat ovat kolmilapaisia ja vaaka-akselisia. Kuva 2 esittää perintäistä tuulivoimalaa, joiden korkeus vaihtelee 50–180 metrin välillä. Tärkeimpiä tuulivoimalan komponentteja ovat roottori, generaattori, muuntaja, vaihteisto sekä torni. [6] Tuulivoimalan roottori koostuu lavoista ja navasta. Tuulen pyörittäessä roottoria sen liike-energia muuttuu roottorin mekaaniseksi energiaksi. Roottorin pyöriessä roottoriin yhdistetty generaattori tuottaa sähköä, joka voidaan siirtää tuulivoimalasta suoraan sähköverkkoon tai varastoida myöhempää käyttöä varten. Varastoimalla tuulienergiaa voidaan vähentää tuulienergian vaihtelevuuden vaikutusta energian saantiin. [5, s. 33–46] [7]



Kuva 2. Perinteinen kolmilapainen tuulivoimala [8]

Valtio on tukenut uusien tuulivoimaloiden rakentamista, jonka vuoksi tuulivoimaloiden määrä on kasvanut Suomessa huomattavasti viime vuosina. Nykyisin tuulivoimaloiden rakentaminen on kannattavaa myös ilman valtion tukea. Viime vuosina tuulivoimaloiden koko on kasvanut ja tekniikka kehittynyt. Suomessa tuulivoimaloiden keskimääräinen koko on 4 MW, mutta suurimmat voimalat ovat kooltaan noin 5,6 MW. Vuonna 2020 tuulivoimaloiden kokonaiskapasiteetti Suomessa oli hieman vajaa 2600 MW. [6] Vuonna 2021 tuulisähkön osuus koko Suomen sähköstä oli 11,7 % [9, s. 3]. Kuvasta 3 esitetään, kuinka paljon tuulisähkön osuus on kasvanut kokonaissähköntuotannossa.



Kuva 3. Suomen sähköntuotannon muutos vuosina 2000–2020 [10]

Energiatuotantomuodot voidaan jakaa perusvoimaan tai säätövoimaan. Perusvoima on energiaa, jonka tuotantoa ei säädetä kulutuksen mukaan vaan se tuottaa lähes saman määrän energiaa joka hetki. Esimerkiksi ydinvoima on perusvoimaa. Säätövoimalla energian kulutus ja tuotanto pyritään saamaan tasapainoon. Säätövoimana käytetään Suomessa vesivoimaa sekä sähköä, joka ostetaan naapurimaista. Tällä hetkellä tuulisähkö vaatii muiden energiatuotantomuotojen säätöä, koska sen tuotanto on riippuvaista tuulen voimakkuudesta, joka on vaihtelevaa. Mitä enemmän säästä riippuvaa tuulivoimaa on kytketty sähköverkkoon, sitä enemmän tarvitaan myös säätövoimaa. [6] Tuulienergian varastoinnilla pyritään siihen, että myös tuulisähkö voi toimia säätövoimana.

3. ENERGIAN VARASTOINTIMENETELMÄT

Tässä luvussa perehdytään erilaisiin energian varastointimenetelmiin. Luvussa 3.1 käsitellään energian varastoinnin perusteita ja syitä sen käyttöön. Luvussa 3.2 käsitellään akkujen käyttöä energiavarastona, akkujen materiaaleja sekä niiden tulevaisuutta. Muita energian varastointikeinoja, esimerkiksi vetyä, vauhtipyöriä ja energian varastointia paineilmaan käsitellään luvussa 3.3.

3.1 Energian varastointi

Sähköverkkojärjestelmän toimimiseksi hyvin sähkön tarjonnan ja kulutuksen on oltava tasapainossa. Kun kulutus ylittää tarjonnan nykyisin, joustoa sähköjärjestelmään saadaan käyttämällä hiiltä, kaasua ja vesivoimaa. [11, s. 1] Tarjonnan ylittäessä kulutuksen ylimääräinen sähkö menee hukkaan [12]. Energian varastoinnilla tarjontaa ja kulutusta pystytään tasapainottamaan.

Energian varastoinnissa energia muuttuu muodosta toiseen esimerkiksi liike-energia sähkökemialliseksi energiaksi [12]. Energiaa voi varastoida esimerkiksi akkuihin, vetyyn, termiseen energiavarastoon ja vauhtipyöriin [13]. Parhaiten tuulisähkön varastointiin sopivat edulliset sähkövarastot tuulisähkön matalan hinnan vuoksi.

3.2 Akut

Energian varastointi akkuihin perustuu sähkökemiaan. Sähköenergia muutetaan kemialliseksi energiaksi, kun energia varastoidaan akkuun. Myöhemmin akkujen luovuttaessa energian takaisin käyttöön se muuttuu takaisin sähköksi. [14, s. 154]

Tavallisesti akkumateriaaleina käytetään lyijyä ja litiumia. Akut koostuvat sähkökemiallisista kennosta tai kennoista, jotka ovat rinnan kytkettyjä tai sarjaan kytkettyjä. Akkujen toiminta perustuu elektronien virtaukseen anodilta katodille. Anodi on negatiivisesti varautunut elektrodi ja katodi taas positiivisesti varautunut elektrodi. Elektronien virtaus anodilta katodille tapahtuu pitkin elektrolyyttiä, joka on liuos, jonka joukossa on suoloja. Näiden elektronien virtauksen seurauksena syntyy jännite sekä sähkövirta. Jännite on riippuvainen kemiallisen reaktion energiasta. [14, s. 154]

Akuilla voidaan varmistaa energian saanti myös kulutushuippujen aikana. Vähäisen kulutuksen aikana akkuihin voidaan varastoida edullista sekä vaihtelevaa energiaa esimer-

kiksi tuulivoimaa. Tämä energia saadaan käyttöön kulutushuippujen aikana. Kulutushuippujen tasaamisen lisäksi akkujen käyttö on kannattavaa tuotannon sekä sähkön siirron ja jakelun näkökulmasta. [14, s. 155]

Akkujen tekniikkaa kehitetään ja niiden hintojen odotetaan laskevan. Siihen johtavat akkujen huoltotarpeen väheneminen ja toimintavarmuuden paraneminen. [14, s. 155] Hintojen laskun sekä toimivuuden paranemisen vuoksi voidaan ennustaa akkujen käytön nousua.

3.3 Muita energian varastointikeinoja

Yksi mahdollinen sähkön varastointikeino on vety. Vetyä voidaan valmistaa veden elektrolyysillä, jossa sähkövirran avulla vedestä syntyy vetyä ja happea. Myöhemmin tämä vety voidaan käyttää polttoaineena. Polttokennossa vety ja happi yhdistyvät synnyttäen vettä sekä luovuttaen samalla energiaa. [13, s. 95–117] Vety ei ole kuitenkaan vielä yleistynyt energian varastointikeinona maailmalla [15].

Vetyenergiavaraston etu on sen päästöttömyys, koska vedyn käytössä ainoa syntyvä päästö on vesi. Vedyn tuotantoon ei myöskään tarvita suuria laitoksia, joten sitä voidaan tuottaa paikallisesti siellä, missä sitä tarvitaan. Haasteena on elektrolyysin kalleus. [13, s. 95–117]

Sähkön varastointi onnistuu myös vauhtipyöriin. Niihin varastoidaan liike-energiaa, joka voidaan muuttaa takaisin sähköksi tarvittaessa. Vauhtipyöriä voidaan rakentaa erilaisilla tekniikoilla ja varastoitavan energian suuruus vaihtelee. Varastointisuuruudet voivat olla esimerkiksi 9 ja 26 kWh välillä. Vauhtipyörät rakennetaan yleensä maan alle vaaratilanteiden varalta. Vikatilanteissa niistä mahdollisesti irtoavilla osilla on suuri nopeus, joka voi aiheuttaa vahinkoa. [13, s. 55–68]

Viimeisenä perehdytään energian varastointiin paineilmaan, jossa hyödynnetään ilman paisumista sekä puristumista. Ensin ilmaa puristetaan puristuskoneella, jonka jälkeen puristettu ilma säilötään varastoon. Energiaa vapautettaessa takaisin käyttöön ilma laajenee, jolloin siitä saadaan energia talteen paisuntajärjestelmän avulla. Joidenkin paineilma-energiavarastointijärjestelmien hyötysuhde on noin 70–80 %. [16, s. 151] Paineilmaan perustuvat energiavarastotkaan eivät ole kovin yleistyneitä.

4. AKKUJEN KÄYTTÖ TUULISÄHKÖN VARASTOINNISSA

Luvussa 4 perehdytään akkujen käyttöön tuulisähkön varastoinnissa. Luvussa 4.1 käsitellään akkuenergiavarastosysteemiä eli BESS:ä. Luvussa perehdytään BESS:n toimintaperiaatteeseen sekä komponentteihin. BESS:n materiaaleja sekä niiden vahvuuksia ja heikkouksia käsitellään luvussa 4.2. Luvussa 4.3 perehdytään lois- ja pätötehon vaikutuksiin akkuihin yhdistetyssä tuulivoimalassa. Luvun 4.4 aihe on BESS:n käytön optimointi ohjausjärjestelmien avulla. BESS:n vahvuuksiin ja heikkouksiin perehdytään luvussa 4.5. Luvussa 4.6 käsitellään tuulipuistoihin yhdistettyjä akkuja Suomessa; niiden määrää sekä kokoa.

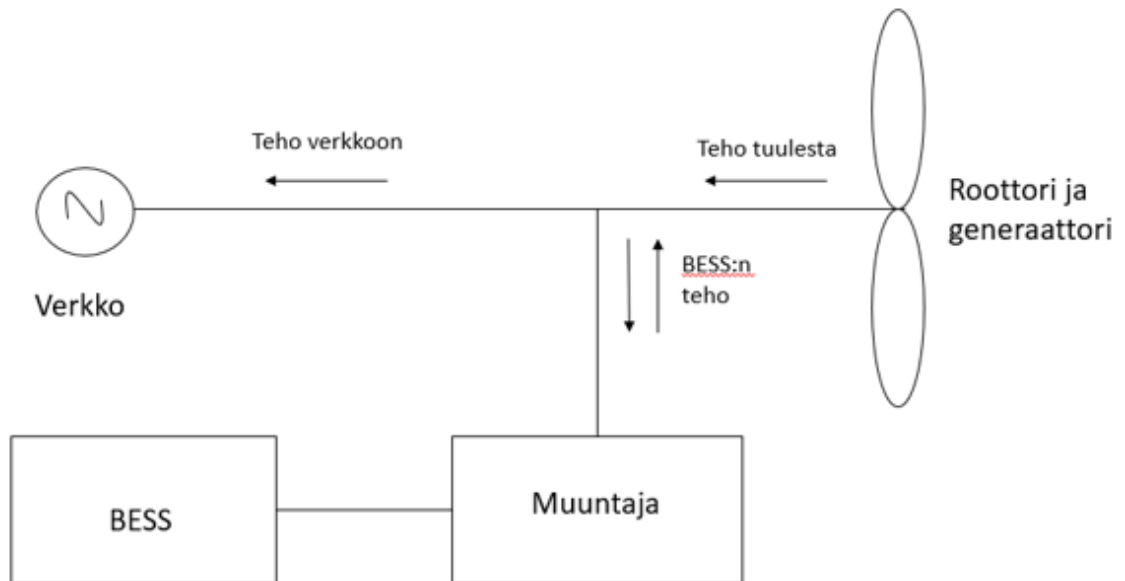
4.1 BESS ja sen toiminta

Kuten luvussa 2 todettiin, tuulen keskinopeus vaihtelee voimakkaasti vuorokauden, vuodenajan ja vuoden mukaan. Vaihtelevuuden vuoksi myös tuulisähkön tuotanto vaihtelee, jolloin sähkön kysyntä ja tarjonta eivät aina kohtaa. Kysynnän ja tarjonnan epätasapainossa on muitakin ongelmia kuin se, että tuulisähkö ei pysty kattamaan kaikkea kuluusta. Niitä ovat tehonvaihtelu ja ongelmat jännitteen vakaudessa. Sähkön varastoinnilla akkuihin ja niiden ohjausjärjestelmien avulla pyritään ratkaisemaan näitä ongelmia.

Kulutuksen ollessa pienempi kuin tuulivoimalalla tuotettu energia sähkö varastoidaan akkuihin. Varastoitu energia voidaan jakaa takaisin sähköverkkoon myöhemmin tuulen ollessa tyyni tai kulutuksen noustessa. BESS (Battery Energy Storage System) tarkoittaa akkuja energiavarastona. Toinen vaihtoehto on virtausakku, jonka toimintaperiaate on erilainen kuin BESS:n [17]. BESS:ä pidetään taloudellisena ja lupaavana keinona varastoida energiaa hajautetussa energiantuotannossa, mutta niiden käyttöön liittyy myös haasteita.

Tuulienergian varastointi tapahtuu muuntajan kautta, jolloin BESS voi sekä vastaanottaa että luovuttaa energiaa [7]. BESS varastoi tuulisähkön kemialliseksi energiaksi. Kuvassa 4 on esitetty BESS:n toiminta. Tuulen kineettinen energia muuttuu tuulivoimalan roottorissa mekaaniseksi energiaksi ja generaattorissa sähköenergiaksi. Sähkö voi siirtyä joko suoraan sähköverkkoon tai muuntajan kautta BESS:in. BESS:stä varastoitu energia vapautetaan sähköverkkoon saman muuntimen kautta. Tuulivoiman tehoa säätelemällä

sen todellisen tehon ja ennustetun tehon ero pysyy mahdollisimman matalana. Tuulipuiston kokonaisteho on tuulivoimaloista tuleva teho lisättynä BESS:n luovuttamaan tehoon.



Kuva 4. Tuulivoimala yhdistettynä BESS:in perustuu lähteeseen [7]

BESS:ä voidaan käyttää säätöenergiana, koska useimpien akkujen vasteaika on alle sekunnin, joten BESS:ä käyttämällä kulutuksen muutoksiin pystytään vastaamaan nopeasti. Toistuva latauspurkaussykli, jonka säätö vaatii, voi kuitenkin lyhentää akun käyttöikä huomattavasti. Latauksen ja purkautumisen aikana syntyy myös hieman energiahäviöitä. [17,18,19]

4.2 BESS:n materiaalit

BESS:n akku voidaan valmistaa monista eri materiaaleista. Akkutekniikan valinta voi olla hankalaa ja siihen vaikuttavat esimerkiksi akun kapasiteetti sekä hinta. Tuulivoiman varastointiin soveltuvia akkutekniikoita ovat esimerkiksi litiumioni-, lyijyhappo-, nikkelikadmium- ja natriumrikkiakut. [7] Akkutyypin vahvuudet ja heikkoudet on esitetty taulukossa 1.

Merkittävä tekijä, joka vaikuttaa akkutyypin valintaan, on sen kustannukset. Usein materiaalien kustannusten käänköpuolena on akun lyhyt käyttöikä, joten suurempi investointi voi olla kannattavaa, jos akun käyttöikä on tällöin pidempi. Valintaan vaikuttaa kuitenkin myös muut tekijät esimerkiksi akun energiatiheys, joka tarkoittaa varastoidun energian ja akun massan tai tilavuuden suhdetta. Akku voi vaatia polarisointia, joten polarisointi-

kerroin vaikuttaa siihen, kuinka hyvin akku toimii. Parhaassa tapauksessa polarisointikerroin on suuri. Lisäksi akun valintaan ja sen aiheuttamiin kustannuksiin vaikuttaa myös sen asennuksen helppous sekä huollon tarve. [7]

Taulukko 1. Eri akkutyypin vahvuudet ja heikkoudet, taulukko muokattu lähteestä [7, s. 2]

| Akkutyyppi | Vahvuudet | Heikkoudet |
|------------------|---|--|
| Lyijyhappo | Matalat investointikustannukset, helppo asennus ja korkea polarisointikerroin | Lyhyt käyttöikä, säännöllisen huollon tarve ja suorituskyvyn heikkeneminen joissakin lämpötiloissa |
| Litiumioni | Pitkä käyttöikä ja korkea energiatehokkuus | Suuret kustannukset ja turvallisuusriskit |
| Nikkelipohjainen | Pitkä elinkaari, vähäinen huollon tarve ja akun nopeat purkausvälit | Matala polarisointikerroin ja suuret kustannukset |
| Natriumrikki | Energiatehokkuus, tehotehokkuus, energiakapasiteetti ja pitkä elinkaari | Lämmönhallinta |

4.3 Pätötehon ja loistehon hallinta

Pätösähkö tarkoittaa niin sanottua tavallista sähköä, jota kuluttajat käyttävät. Pätöteho riippuu tuulen voimakkuudesta. Pätötehon optimoinnin avulla voidaan saada tuulipuiston kustannuksia pienemmiksi. Loissähkö taas tarkoittaa sähköä, joka tarvitaan, jotta sähköverkko toimii. Loistehon suuruus riippuu laitteista ja sen tarkoituksena on pitää jänniteprofiili sopivana sekä varmistaa tehohäviön pysyminen mahdollisimman pienenä. Loissähkö kulkee sähköverkossa edestakaisin, mutta kuluttajat eivät sitä käytä. Pätö- ja loistehoa voidaan hallita ja optimoida erilaisten laitteiden avulla. Niitä ovat esimerkiksi kytkimet, kompensattorit ja kondensaattoripankkeja. [11, s. 1–5] [20] [21, s. 1–2]

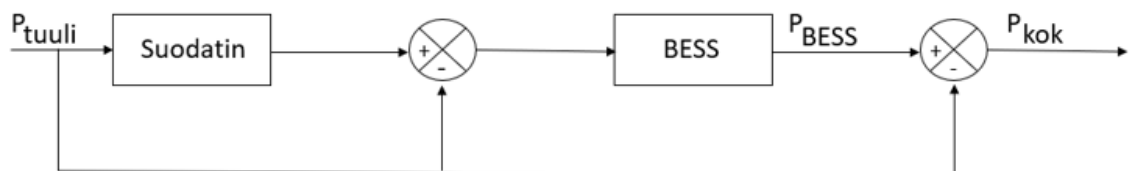
Loistehon hallinnan avulla saadaan vähennettyä tehohäviötä ja jännitepoikkeamia. Tällöin sähkön laatu paranee jakeluverkossa ja jännitteen vaihtelut pienenevät. Jännitteen vaihteluista seuraa tehohäviötä, koska se lisää läpimenovirtaa generaattorissa. [22, s.

2] BESS:n avulla pystytään siis varmistamaan turvallinen ja vakaa sähköverkon toiminta myös äärimmäiset tapahtumat huomioitaessa. [21, s. 1–14] Tuulipuistoissa tuulivoimailloilla on suuri loisteho, joten ne pystyvät varmistamaan tarvittavan loistehon myös sähköverkkoon. [21, s. 11]

4.4 Ohjausjärjestelmät

BESS:n käyttö vaatii myös sen säätämistä, jolla mahdollistetaan mahdollisimman optimoitu käyttö säatelemällä akun tehoa ja lataustasoa. Tällä optimoinnilla pyritään minimoimaan BESS:n kustannukset. Optimointi toteutetaan ohjausjärjestelmien avulla. Tärkeimpiä niistä ovat tuulivoiman suodatuksen sekä akun lataukseen ja purkautumiseen perustuvat ohjausjärjestelmät, lisäksi uusissa tutkimuksissa tuuliennusteisiin perustuva järjestelmä on osoittanut olevansa lupaava. Ohjausjärjestelmien käytöllä pystytään pienentämään BESS:n aiheuttamia kustannuksia. [7]

Tuulivoiman suodatus on yleinen ohjausjärjestelmä, joka perustuu tuulivoiman syöttämiseen suodattimeen, suodattimen tehon tarkasteluun ja sen avulla tehon säätämiseen. Kuvasta 5 nähdään, kuinka tuulivoimalasta tuleva teho siirtyy ensin suodattimeen ja sen jälkeen joko BESS:n tai sähköverkkoon. Tuulivoiman suodatuksen etuja ovat helppokäyttöisyys ja reaaliaikaisuus. Erilaisia suodatintyypppejä on esimerkiksi alipäästö-, ylipäästö- ja Kalman-suodatin. Näistä suodattimista alipäästösuodatin on yleisimmin käytössä. Se päästää matalataajuisen sähkön lävitseen, mutta poistaa korkeataajuisen sähkön. [7]



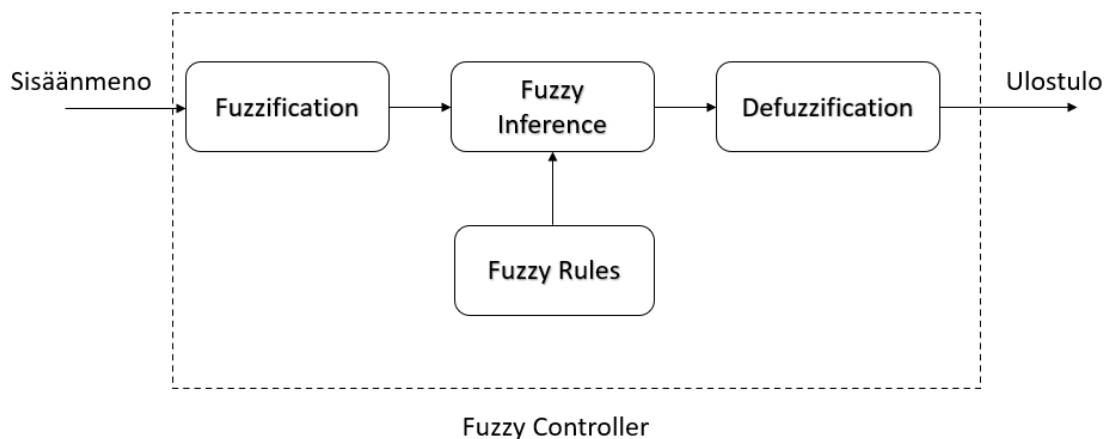
Kuva 5. Tuulivoiman suodatuksen perustuvan ohjausjärjestelmän periaate, perustuu lähteeseen [7]

Akkujen lataukseen ja purkautumiseen perustuva ohjausjärjestelmä perustuu latauksen ja purkautumisen jatkuvaan vaihteluun. Näitä ohjausjärjestelmiä on monia erilaisia esimerkiksi PI, PID, H^∞ ja epälineaarinen ennustussäätö. Latauspurkaustekniikan vioittuessa voi akuissa esiintyä polarisaatiota ja ylikuumentumista. [7] Akun jatkuva purkautuminen ja lataus voi kuitenkin vaikuttaa akun elinikään.

Vaikka aikaisemmin käsitellyt ohjausjärjestelmät ovatkin merkittävimpiä tuulivoimalan tehon hallintaan, myös tuulen nopeuden ennustamiseen perustuva ohjausjärjestelmä on

osoittanut sen pystyvän parantamaan merkittävästi tuulivoimalan suorituskykyä. Tuulen nopeuden ennustamisen avulla voidaan tuottaa tuulisähköä etukäteen varastoon, jos tiedetään tuulen nopeuden olevan pieni myöhemmin. Ohjausjärjestelmä perustuu aiempiin mittauksiin, joissa on selvitetty tuulivoiman keskimääräistä tehoa. [7]

Yleistä epävarmuutta varten on kehitetty Fuzzy Systems eli niin sanotut ”epämääräiset ohjausjärjestelmät”. Tällä järjestelmällä pystytään myös vähentämään ihmisten ajatusten epäselvyyden vaikutusta ohjausjärjestelmän ja tuulipuiston toimintaan. Kaikissa tapauksissa kulutuksen ja tuotannon välisiä matemaattisia malleja ei ole mahdollista selvittää, jonka takia Fuzzy Systems on kehitetty. Sen avulla voidaan mallintaa monimutkaisia järjestelmiä ilman tällaisia matemaattisia malleja. Fuzzy Systems on käytössä lataukseen sekä purkaukseen perustuvassa ohjausjärjestelmässä, että tuulivoiman suodatukseen perustuvassa ohjausjärjestelmässä. Kuvasta 6 nähdään, että Fuzzy Systems on melko monimutkainen ja se sisältää useampia erilaisia toimintoja. [7]



Kuva 6. Fuzzy Systems:n toiminta, perustuu lähteeseen [7]

Eräässä tutkimuksessa [21, s. 10–11] vertailtiin BESS:n ohjausjärjestelmien kustannuksia. Tutkimuksessa vertailtiin tilannetta, jos BESS ei ollut käytössä sekä kolmea tilannetta, joissa käytettiin eri ohjausjärjestelmää. Kustannukset nousivat suurimmiksi, kun BESS ei ollut lainkaan käytössä. Tässä tilanteessa kaikki sähkö jouduttiin syöttämään verkkoon kulutuksen vaihteluista huolimatta. Tapauksissa, jossa BESS oli käytössä, sähkön verkkoon syöttöä saatiin säädeltyä. Kannattavimmiksi tutkimuksessa osoittautui ohjausjärjestelmä, joka perustui aikaisimmin kerättyyn dataan ja sen keskiarvoihin. Muissa tutkimuksissa ohjausjärjestelmänä käytettiin aikaisempiin tuloksiin perustuvaa k-means klusterointia sekä äärimmäisiin skenaarioihin perustavaa ohjausjärjestelmää. Äärimmäisiin skenaarioihin perustuvan ohjausjärjestelmän kustannukset nousivat suuriksi sen investointien suuruuden takia. [21, s. 10–11]

BESS:n toimintaa voidaan ohjailta myös sähkön hinnan mukaan. BESS:n on kannattavaa varastoida energiaa sähkön hinnan ollessa matalaa ja luovuttaa se sähkön hinnan noustessa. Tämä on kannattavaa, koska silloin samasta energiasta saadaan suurempi hinta. [21, s. 11]

4.5 BESS:n vahvuudet ja heikkoudet

Tuulivoiman ja BESS:n käyttöön liittyy teknisiä haasteita, joista useimmat liittyvät BESS:n käyttöön [19]. Suurimpia haasteita BESS:n käytössä tuulisähkön varastointiin on akkujen hinta. Toinen kustannuksia lisäävä tekijä on muuntimen hinta, koska muuntimen on oltava kaksisuuntainen, jotta se pystyy sekä vastaanottamaan että luovuttamaan energiaa. Kustannuksia voidaan pienentää kuitenkin edellisessä luvussa mainittujen ohjausjärjestelmien käytöllä. [7] [11, s. 5] Kustannuksien suuruus on vaikuttava tekijä kaikkien uusien teknologioiden yleistymisessä niin myös BESS:n.

BESS:n tutkimustyö on tapahtunut suurimmalta osin vakaissa tuuliolosuhteissa, joten tuulen vaihtelevuuden vaikutus BESS:n toimintaan ei ole vielä täysin selvillä. Tuulen vaihtelevuus voi vaikuttaa esimerkiksi BESS:n komponenttien kestävyys, jonka vuoksi kustannukset voivat nousta ja huoltotarve lisääntyä. Lisäksi BESS:n toimintaa pystytään optimoimaan parhaiten, jos tuuliennusteet tiedetään etukäteen. Tämän vuoksi varsinkin lyhyen aikavälin tuuliennusteiden tarkkuutta on parannettava, jotta BESS:n tehokas käyttö saadaan varmistettua. [11, s. 5]

BESS:n vahvuus on sen hyvä energiatehokkuus, joka tarkoittaa sitä, että energian ominaiskulutus pienenee [7]. Hyvään energiatehokkuuteen pyritään kaikissa uusissa teknologiaratkaisuissa. Energiatehokkuuden avulla saadaan vähennettyä sekä kustannuksia että päästöjä. Sen lisäksi sähköverkon jännitteen laatu parantuu BESS:tä käyttämällä [21, s. 11]. Sähköverkko vaatii hyvän sähkön laadun toimiakseen luotettavasti ja hyvin.

BESS:n vahvuus on myös sen asentamisen helppous. BESS on melko kompakti ja asennuspinta-ala vähäinen, joten sitä varten ei tarvita suurta tilaa ja se voidaan asentaa paikkaan, joka on liian ahdas muille energian varastointikeinoille. BESS:n koko voidaan määrittää tuulipuiston koon ja aikaisemmin tehtyjen mittausten mukaan. Tämän takia BESS voi toimia myös sellaisten tuulipuistojen energiavarastona, joihin muut energiavarastointikeinot eivät sovellu [19]. Sen lisäksi sen huoltotarve on vähäinen, joka vähentää lisäkuluja. [7]

4.6 Akkujen käyttö tuulivoiman varastoinnissa Suomessa

Kuten luvussa 4.2 todettiin, tuulisähkön osuus Suomen sähköntuotannosta on jo yli 10 %. Suurien yli 5 MW:n akkuenergiavarastojen käyttö tuulivoimaloihin yhdistettynä on kuitenkin vielä vähäistä. Tämä tyyliä tuulipuistoja on kuitenkin jo toteutettu ja suunniteltu myös Suomeen. Iissä Viinamäen 21 MW:n tuulipuistossa sen tuulivoimalat on yhdistetty 6 MW:n akkuvarastoon. Helen on investoinut 5 MW:n akkuun Lakiakangas 3 -tuulipuistossa. [23,24] Tässä luvussa esitellään esimerkin omaisesti näitä kahta tuulipuistoa.

Viinamäen tuulipuisto on Suomen ensimmäinen tuulipuisto, johon on yhdistetty suuren kokoluokan akkuvarasto. Tuulipuiston muodostaa viisi tuulivoimalaa, joiden teho on 4,2 MW sekä niihin yhdistetty 6 MW:n akku. Akun teho on noin kolminkertainen aikaisemmin rakennettuihin verrattuna. Myös tuulivoimalat ovat suuria, kun verrataan niiden korkeutta ja pyyhkäisy-pinta-alaa aikaisemmin valmistettuihin. Tuulivoimalat olivat rakentuessaan pohjoismaiden korkeimmat. Viinamäen tuulipuiston rakentamiseen ei ole käytetty yhteiskunnan tukea. [23]

Lakiakangas 3 -tuulipuisto on rakenteilla Pohjanmaalle, Kristiinankaupungin ja Isojoen kuntiin. Sen odotetaan valmistuvan vuoden 2022 lopulla. Lakiakankaalle sijoitettava akku on toinen suuri akkuvarasto, joka yhdistetään tuulivoimalaan Suomessa. Akkuvaraston tarkoituksena on turvata sähköjärjestelmän tasapaino pohjoismaissa äkillisten muutosten hetkellä. [24]

Suomessa tuulipuistoihin yhdistettyjen suuren kapasiteetin akkuvarastojen määrä ei ole suuri. Niiden investointiin kannustaa kuitenkin tuulienergian laskenut hinta sekä akkuteknologioiden kehittyminen. Lisäksi vuonna 2023 Suomen sähkönmyynnissä otetaan käyttöön 15 minuutin tasejakso, jonka vuoksi sähkön kulutus ja tuotanto pitää tasapainottaa 15 minuutin välein aikaisemman tunnin sijaan. Tällöin sähkövarastojen käytöllä voidaan tasapainottaa kulutuksen ja tuotannon eroja. [24]

Akkuvarastoihin investoimisen kiinnostus on lisääntynyt myös uusiutuvien energialähteiden, varsinkin tuulienergian, käytön kasvun vuoksi. Tuulivoimalla tuotetaan yhä suurempi osa Suomen sähköstä, joten sen tuotantoa pitää pystyä ohjailemaan ja säätelämään. Mahdollisuus varastoida tuulivoimaa voi vähentää fossiilisten polttoaineiden kuten kaasuturbiinien tarvetta säätövoimana. Se, yleistyvätkö tuulivoimaloihin yhdistetyt akkuvarastot selviää tulevaisuudessa. Siihen vaikuttaa akkuvarastojen kustannusten ja toimivuuden lisäksi myös muiden energiatuotantomuotojen hinta ja toimivuus. Lisäksi päästökauppa, muut poliittiset päätökset ja yleinen maailman tilanne voivat vaikuttaa sen yleistymiseen.

5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi vuoksi uusiutuvien energialähteiden, kuten tuulienergian, käyttö on lisääntynyt viime vuosina huomattavasti. Tuulen voimakkuuden vaihdellessa vuorokausien sekä vuodenaikojen mukaan myös tuulienergian tuotanto on vaihtelevaa. Energiankulutus voi kuitenkin olla suurta myös tuulettomina aikoina, kun tuulienergiaa ei saada, jolloin syntyy kulutuksen ja tuotannon välinen epätasapaino. Tällä hetkeä sähköverkkoa tasapainotetaan vesivoimalla sekä kaasuturbiineilla. Uusiutuvan energian lisääntymisen vuoksi joustoa tarvitaan lisää, ja yksi ratkaisu tähän voisi olla energian varastointi esimerkiksi akkuihin. Tässä kandidaatintyössä pyrittiin selvittämään tuulipuistoihin yhdistettyjen akkujen heikkouksia, vahvuuksia ja tulevaisuuden näkymiä Suomessa sekä erilaisten akkutekniikoiden ominaisuuksia.

Akkutekniikoita on monenlaisia ja niiden ominaisuudet eroavat toisistaan. Tärkeimpiä ominaisuuksia akkutekniikoilla ovat niiden elinikä, kustannukset sekä energiatiheys. Litiumioniakulla sekä nikkelpohjaisilla akuilla on pitkä elinikä sekä vastapainona melko suuret kustannukset. Lyijyhapon ominaisuudet ovat päinvastaiset ja sillä on lyhyt elinikä sekä matalat kustannukset. Litiumioniakun vahvuus on myös sen suuri energiatiheys. Neljäs tavallinen akkutekniikka on natriumrikkiakku, jonka vahvuuksia ovat sen energiatehokkuus, tehotiheys, energiakapasiteetti ja pitkä elinkaari. Toisaalta natriumrikkiakun käytössä voi olla haasteita lämmönhallinnassa.

Akun käyttö tuulisähkön energiavarastona on lupaava teknologia. Yksi sen suurimmista vahvuuksista on sen energiatehokkuus. Akkuja käyttämällä suurempi osa tuulivoimalan tuottamasta energiasta saadaan hyödynnettyä ja hukkaenergian määrä pienenee, jonka takia tuulipuiston energiatehokkuus paranee. Toinen hyöty on tuulivoimalan sähkön laadun parantuminen jännitteen laadun parantuessa. Jännitteen laadun paraneminen johtuu taajuusvaihteluiden vähenemisestä, jotka ovat yleisiä tuulisähkössä. Lisäksi akun asentaminen on helppoa, huoltotarve vähäinen ja se ei vie suurta tilaa, joten akku voi sopia energian varastointikeinoksi tilanteeseen, jonne toiset varastointikeinot eivät mahdusi.

Suurempia haasteita tuulivoimaloiden ja akkujen yhdistämisessä ovat kustannukset. Akkuteknologioiden kehittyessä kustannukset voivat kuitenkin pienentyä. Lisäksi ohjausjärjestelmien, esimerkiksi tuulivoiman suodatukseen, akun lataukseen ja purkaukseen sekä

tuulen nopeuden ennustamiseen perustuvien ohjausjärjestelmien, käyttö voi myös laskea kustannuksia. Tällaista ohjausta ja optimointia voidaan tehdä myös sähkön hinnan avulla, jolloin tuulipuistoista voidaan saada entistä kannattavampia.

Tuulipuistoihin yhdistettyjen akkuvarastojen yleistyminen riippuu suuresti akkujen hinnasta sekä muutoksista energiamarkkinoilla sekä politiikassa. Akkujen hintojen laskeessa, teknologioiden kehittyessä, niiden kysyntä luultavasti kasvaa ja ne voivat yleistyä. Suomen tavoitteena on, että vuonna 2030 yli puolet käytetystä energiasta olisi tuotettu uusiutuvilla energialähteillä. Todennäköisesti tuulisähkön osuus koko sähkön tuotannosta kasvaa, joka vaatii energian varastoinnin lisäämistä, joka myös kasvattaa akkujen yleistymisen todennäköisyyttä. Lisäksi päästökauppa ja siitä seuraavat muutokset energiataloudessa vaikuttavat akkujen yleistymiseen.

Suomessa suuret akut tuulipuiston energiavarastona eivät ole vielä yleistyneet. Akkuja yhdistettynä tuulipuistoon on Suomessa yksi, lissä Viinamäen tuulipuistossa. Toinen samantyyppinen akkuratkaisu on rakenteilla Lakiakangas 3 -tuulipuistoon Pohjanmaalle. Jos nämä tuulipuistot sekä akut osoittavat toimivansa vakaasti, luotettavasti sekä taloudellisesti tällaiset teknologiat voivat alkaa yleistyä Suomessa.

LÄHDELUETTELO

- [1] ”Uusiutuvan energian RED II -direktiivi”, *Motiva*. https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan_energian_red_ii_direktiivi (viitattu 18. helmikuuta 2022).
- [2] <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliatlas>, ”Tuuliatlas - Ilmatieteen laitos”. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuuliatlas> (viitattu 6. toukokuuta 2022).
- [3] ”Tuulivoimaloiden purku ja kierrätys”, *Suomen Tuulivoimayhdistys*. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietopankki/tuulivoimaloiden-purku-ja-kierratys> (viitattu 18. helmikuuta 2022).
- [4] ”Tamperealaisella menetelmällä rikkinäisestä akusta voi tehdä lähes uudenveroisen. Laboratorioissa syttynyt tulipalo todistaa, että samaa ei kannata yrittää kotiloissa. - HS Visio | HS.fi”. <https://www.hs.fi/visio/art-2000008246323.html> (viitattu 18. helmikuuta 2022).
- [5] D. Chiras, *Wind Power Basics: A Green Energy Guide*. Gabriola Island, UNITED STATES: New Society Publishers, 2010. Viitattu: 18. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=515437>
- [6] ”Tuulivoima”, *Motiva*. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima (viitattu 18. helmikuuta 2022).
- [7] L. M. S. de Siqueira ja W. Peng, ”Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review”, *J. Energy Storage*, vol. 35, 102252-, 2021.
- [8] J. S. John, (*photo by Mary Ellen St. John*). 2010. Viitattu: 5. toukokuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_\(Adair_Wind_Farm,_Iowa,_USA\)_8_\(48915520863\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_(Adair_Wind_Farm,_Iowa,_USA)_8_(48915520863).jpg)
- [9] Energiateollisuus ry - Finnish Energy Industries, ”Energiavuosi 2020 - Sähkö”, 09:12:29 UTC. Viitattu: 6. toukokuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.slideshare.net/energiateollisuus/energiavuosi-2020-shk>
- [10] T. Myllymaa, ”Tilastokeskus - Sähkön ja lämmön tuotanto 2020”. https://www.stat.fi/til/salatuo/2020/salatuo_2020_2021-11-02_tie_001_fi.html (viitattu 15. maaliskuuta 2022).
- [11] R. Abhinav ja N. M. Pindoriya, ”Grid integration of wind turbine and battery energy storage system: Review and key challenges”, in *Proceedings of the IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 1–6.
- [12] M. Khalid, N. Arshid, ja N. Grace, *Advances in Supercapacitor and Supercapattery: Innovations in Energy Storage Devices*. San Diego, UNITED STATES: Elsevier, 2020. Viitattu: 23. helmikuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=6421104>
- [13] R. A. Huggins, *Energy Storage*. Boston, MA: Springer US, 2010.

- [14] F. S. Barnes ja J. G. Levine, *Large Energy Storage Systems Handbook*. Baton Rouge, UNITED STATES: Taylor & Francis Group, 2011. Viitattu: 1. maaliskuuta 2022. [Verkossa]. Saatavissa: <http://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=681284>
- [15] ”Suomesta uusiutuvan energian mallimaa? Kokonainen vetytalous aiotaan herättää henkiin EU:n elvytysmiljardeilla”, *Yle Uutiset*, 15. maaliskuuta 2021. <https://yle.fi/uutiset/3-11838445> (viitattu 28. helmikuuta 2022).
- [16] ”Energy Storage: Systems and Components”. https://web-s-ebsohost-com.lib-proxy.tuni.fi/ehost/ebookviewer/ebook/bmx-lymtfXzE2MjUwMjNfX0FO0?sid=a6960739-b889-4a24-82df-3e5e807629c9@redis&vid=0&format=EB&lpid=lp_151&rid=0 (viitattu 28. helmikuuta 2022).
- [17] H. Zhao, Q. Wu, S. Hu, H. Xu, ja C. N. Rasmussen, ”Review of energy storage system for wind power integration support”, *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 545–553, 2015.
- [18] G. He, Q. Chen, C. Kang, Q. Xia, ja K. Poolla, ”Cooperation of Wind Power and Battery Storage to Provide Frequency Regulation in Power Markets”, *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no 5, 3559–3568, 2017.
- [19] D. Villanueva, A. E. Feijóo, ja N. D. Bokde, ”A Strategy for Power Generation Optimization in a Hybrid Wind-BESS Power Plant”, *E3S Web Conf.*, vol. 122, 04004, 2019.
- [20] ”Tiedätkö mistä maksat, kun maksat loissähköstä?”, *Yle Uutiset*, 25. marraskuuta 2016. http://yle.fi/uutiset/tiedatko_mista_maksat_kun_maksat_loissahkosta/9309384 (viitattu 2. maaliskuuta 2022).
- [21] L. Zhang, W. Huang, P. Kang, L. Zeng, Y. Zheng, ja F. Zheng, ”Configuration method of BESS in the wind farm and photovoltaic plant considering active and reactive power coordinated optimization”, *PLoS One*, vol. 16, no 10, p. e0257885, 2021.
- [22] J. Mundackal, A. C. Varghese, P. Sreekala, ja V. Reshmi, ”Grid power quality improvement and battery energy storage in wind energy systems”, in *Proceedings of Annual International Conference on Emerging Research Areas and 2013 International Conference on Microelectronics, Communications and Renewable Energy*, p. 1–6, 2013.
- [23] ”Teollisen mittakaavan akustot tasapainottavat sähköverkkoa – Kestävä Energiatalous – Uusiutuvien tulevaisuus”. <https://www.energiatalous.fi/?p=2442> (viitattu 14. huhtikuuta 2022).
- [24] ”Helen investoi suurimpaan sähkövarastoonsa, joka auttaa turvaamaan koko Pohjoismaiden energiajärjestelmää”, 19. heinäkuuta 2021. <https://www.helen.fi/uutiset/2021/helen-investoi-suurimpaan-sahkovarastoonsa> (viitattu 14. huhtikuuta 2022).

