

Joona Pesonen

VAUHTIPYÖRÄN KÄYTTÖ TUULIVOI- MALLA TUOTETUN SÄHKÖN ENERGIA- VARASTONA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Kari Lappalainen
Huhtikuu 2022

TIIVISTELMÄ

Joona Pesonen: Vauhtipyörän käyttö tuulivoimalla tuotetun sähkön energiavarastona
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaattiohjelma
Huhtikuu 2022

Fossiilisten energiantuotantomuotojen korvaaminen uusiutuvilla energialähteillä on yksi merkittävimmistä keinoista hidastaa ilmastonmuutosta. Tämän seurauksena yhä suurempi osa sähköenergiasta tuotetaan sääriippuvan tuotannon avulla. Sääriippuvan tuotannon kuten tuuli- ja aurinkovoiman käyttöön liittyy kuitenkin haasteita sähkönlaadun sekä tehotasapainon säilyttämisen alueilla. Sähkönlaadun heikkeneminen on seurausta sääriippuvan tuotannon nopeista tehoheilahteluista. Tehotasapainoon liittyvät ongelmat ovat puolestaan peräisin sääriippuvan tuotannon kyvyttömyydestä säätää tuotantoaan kysynnän mukaan. Yhtenä ratkaisuna näiden ongelmien selvittämiseksi on energiavarastojen käyttö sääriippuvan tuotannon yhteydessä.

Tässä työssä on suoritettu kirjallisuuskatsaus tuulivoimaan sekä jo käytössä oleviin energiavarastoteknologioihin. Energiavarastojen kohdalla katsauksen pääpaino on vauhtipyöräenergiavarastoissa. Kirjallisuuskatsauksessa lähteinä on pääasiallisesti käytetty alan oppikirjoja sekä 2010- ja 2020-lukujen tieteellisiä julkaisuja. Lisäksi työssä on mitoitettu vauhtipyöräenergiavarasto 4,5 MW:n nimellistehon omaavan tuulivoimalan yhteyteen. Mitoittaminen on suoritettu MATLAB-ohjelmistolla toteutetun algoritmin avulla.

Nykyisin käytettävistä energiavarastoista parhaiten tehotasapainon säilyttämiseen sopivat esimerkiksi pumppuvesivoima, erilaiset akkuenergiavarastot sekä paineilmavarasto. Näille energiavarastoteknologioille on yhteistä suuri varastointikapasiteetti sekä pitkä varastointiaika. Sähkönlaadun parantamiseen sopivia energiavarastoteknologioita ovat puolestaan kondensaattori, sähkömagneettinen energiavarasto sekä työssä laajemmin käsiteltävä vauhtipyöräenergiavarasto. Näiden teknologioiden keskeisiä ominaisuuksia ovat nopea vasteaika, korkea tehotehoisuus sekä suuri mahdollisten lataus-purkaus-sykliden määrä. Myös akkuihin perustuvia energiavarastoja voidaan käyttää sähkönlaadun parantamiseen, vaikka niiden mahdollisten lataus-purkaus-sykliden määrä onkin edellä esitettyjä teknologioita pienempi.

Vauhtipyöräenergiavaraston kapasiteetiksi määritettiin tässä työssä 100 kWh ja sen tehoksi 1 MW. Määritetyn kokoluokan teoreettisen vauhtipyöräenergiavaraston vuosittaisiksi elinkaarikustannuksiksi laskettiin 110 221 €. Saatuja tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, johtuen useista työssä käytetyistä yksinkertaistuksista sekä hintatietoihin liittyvistä epävarmuustekijöistä.

Työn loppupuolella suoritettu teknistaloudellinen vertailu vauhtipyörä- ja litiumakkuenergiavarastojen välillä osoittaa vauhtipyörän olevan kilpailukykyinen energiavarastoteknologia etenkin nopeiden tehoheilahteluiden tasaamisessa. Ratkaisutekijöinä tässä tarkastelussa voidaan pitää vauhtipyöräenergiavaraston pienempiä elinkaarikustannuksia, suurempaa mahdollisten syklien määrää sekä suhteellista ympäristöystävällisyyttä.

Avainsanat: tuulivoima, energiavarastot, vauhtipyörä, akku

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUULIVOIMALAT	3
2.1 Sähkömagneettinen tausta.....	4
2.2 Generaattorikonseptit.....	5
2.3 Verkkoliitäntä	6
2.4 Tarkasteltava tuulivoimala.....	7
3. ENERGIAVARASTOT.....	8
3.1 Teknologian nykytila.....	8
3.2 Energiavarastojen mitoittaminen	10
4. VAUHTIPYÖRÄ ENERGIAVARASTONA.....	11
4.1 Vauhtipyöräenergiavaraston rakenne ja toimintaperiaate.....	11
4.1.1 Vauhtipyörä.....	12
4.1.2 Sähkökone ja suuntaaja.....	13
4.1.3 Laakerointi ja apujärjestelmät.....	13
4.2 Vauhtipyörän mitoitus.....	14
4.3 Tunnuslukujen laskenta	17
4.4 Teknologian nykytila.....	19
5. TEKNISTALOUEDELLINEN VERTAILU	21
5.1 Akuston tunnuslukujen laskeminen	21
5.2 Energiavarastoteknologioiden vertailu.....	22
6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT.....	24
7. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET	28
LIITE A: MITOITUSOHJELMA	32

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BTB	engl. Back-To-Back, DC-AC-DC suuntaaja
DFIG	engl. Doubly Fed Induction Generator, kaksoissyötetyn epätahtigeneraattorin tuulivoimala
EU	Euroopan Unioni
PMSM	engl. Permanent Magnet Synchronous Motor, kestmagneettitahtikone
SMES	engl. Superconducting Magnetic Energy Storage, sähkömagneettinen energiavarasto
STATCOM	engl. Static Synchronous Compensator, staattinen tahtikompensaattori
UPS	engl. Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön tehonsyöttö
a	annuiteettitekijä
\vec{B}	magneettivuon tiheyden vektorikenttä
C_I	alkuinvestoinnin annuiteetti
C_K	korvauskustannusten annuiteetti
$C_{K\&H}$	käyttö- ja huoltokustannusten annuiteetti
C_p	tuulivoimalan hyötysuhdekerroin
C_{VK}	vuosittaisten kokonaiskustannusten annuiteetti
\overline{ds}	pinnan normaalin suuntainen pinta-ala-alkio
E	vauhtipyörän mekaaninen energia
E_{lataus}	tutkittavalla aikavälillä energiavarastoon ladattu energia
E_{purku}	tutkittavalla aikavälillä energiavarastosta purettu energia
E_{vp}	vauhtipyöraenergiavaraston kapasiteetti
e	indusoitunut jännite
e_m	energiatiheys
η	energiavaraston hyötysuhde
I	hitausmomentti
K	muotokerroin
ω	kulmanopeus
P	pätöteho
P_{anto}	tarkasteluajavälistä riippuva tuulivoimalan verkkoliittymässä näkyvä vakioteho
$P_{tuuli}(t)$	tuulivoimalan hetkellinen pättöteho
$P_{vp}(t)$	vauhtipyöraenergiavaraston hetkellinen teho
ρ	ilmatiheys
ρ_m	valmistusmateriaalin tiheys
σ_m	vauhtipyörän kestävä maksimirasitus
v	tuulennopeus
$x_{leikkaus}$	tuulivoimalan pättötehoikäyrän sekä sen verkkoliittymässä näkyvän vakio antotehon muodostaman suoran leikkauskohtien lukumäärä tutkittavalla aikavälillä

1. JOHDANTO

Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteena on pyrkiä toimiin, joilla maapallon keskilämpötilan nousu saataisiin rajoitettua 1,5 celsiusasteeseen suhteessa esiteolliseen aikaan. Lämpötilan nousua pyritään rajoittamaan tasapainottamalla kasvihuonepäästöt sekä niitä sitovat nielut. Tasapainottaminen tapahtuu kasvihuonepäästöjen vähentämisellä sekä rahavirtojen ohjaamisella kohti vastuullista ja ilmastokestävää kehitystä. [1] Esimerkiksi EU:n jäsenvaltioiden yhteisenä tavoitteena on vähentää sisäisiä kasvihuonepäästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasoon verrattuna [2]. Tämän tavoitteen yhtenä kulmakivenä voidaan pitää sähköntuotannon uudistamista kohti puhtaampia ratkaisuja, kuten tuuli- ja aurinkovoimaa [3].

Uusiutuvien energiantuotantomuotojen osuuden kasvu energijärjestelmässä aiheuttaa kuitenkin haasteita sähköjärjestelmän tehotasapainon säilyttämiselle, jonka mukaan kulutuksen ja tuotannon tulisi vastata joka hetki toisiaan. Esimerkiksi tuulivoiman tuotanto on vahvasti riippuvainen tuulen nopeudesta, jolloin kulutuksen seuraaminen ei välttämättä ole mahdollista [4, s. 1520]. Toisaalta tuulen nopeus vaihtelee jatkuvasti myös lyhyellä aikavälillä, mikä puolestaan aiheuttaa nopeita tehoheilahteluja tuulivoimalan tuotannossa. Sähköverkkoon liitetyn tuulivoiman nopeat tehoheilahtelut vaikuttavat taas negatiivisesti verkon stabiiliuteen [5, s. 218].

Yhtenä ratkaisuna edellä esitettyihin ongelmiin on energiavarastojen käyttö sääriippuvien sähköntuotantomuotojen yhteydessä [6, s. 160]. Energiavarastojen tarkoituksena on tasoittaa tuotannon hetkellistä vaihtelua sekä mahdollistaa tehotasapainon säilyttäminen pitkällä aikaskaalalla. Käytännössä energiaa varastoidaan niinä hetkinä, kun tuotantoa on enemmän kuin kulutusta ja puretaan silloin, kun tuotanto uhkaa jäädä alijäämäiseksi kulutukseen verrattuna. Lisäksi energiavarastoa voidaan käyttää sähkönlaadun parantamiseen, tasapainottamalla nopeita tuotannon tehoheilahteluja [4, s.1520].

Tässä työssä kuvataan vauhtipyörällä toteutetun energiavaraston soveltamista tuulivoimatuotannon tehoheilahtelujen tasaamisessa. Teoriapohjan esittämisen sekä soveltuvuuden tarkastelun lisäksi, työssä mitoitetaan vauhtipyöräenergiavarasto esimerkkituulivoimalan yhteyteen. Lisäksi työssä vertaillaan vauhtipyöräenergiavaraston teknistaloudellisia ominaisuuksia akustolla toteutettuun energiavarastoon. Johtuen vauhtipyöräenergiavaraston suhteellisen suuresta itsepurkautumisnopeudesta, tarkastelu keskittyy minuuttien aikaskaalalla tapahtuvien tehoheilahtelujen tasaamiseen [7, s. 116].

Työ alkaa tuulienergian perusteiden ja tuulivoimatuotannon ominaispiirteiden esittelyllä. Tämän jälkeen työssä käydään läpi jo käytössä olevia energiavarastoja ja niiden ominaisuuksia. Lisäksi työn alussa kuvataan vertailuun käytettävä tuulivoimala sekä energiavaraston mitoittamiseen liittyviä yleisperiaatteita. Seuraavaksi työssä esitellään vauhtipyörän rakennetta ja sen toimintaperiaatetta energiavarastona. Tämän jälkeen vauhtipyöräenergiavarasto mitoitetaan esimerkkituulivoimalaan ja lasketaan sille tunnuslukuja myöhempää vertailua varten. Työn loppupuolella laskettuja tunnuslukuja vertaillaan vastaavan kokoluokan akustolla toteutettuun energiavarastoon ja pohditaan vauhtipyöräenergiavaraston tulevaisuuden näkymiä.

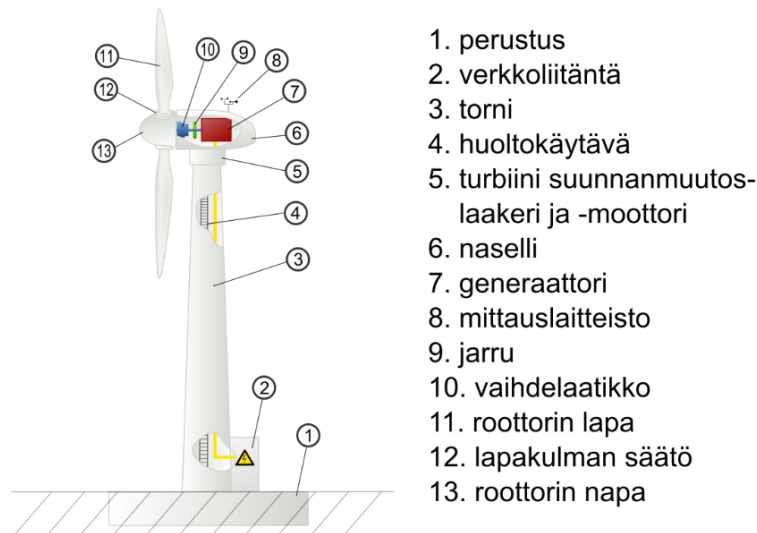
2. TUULIVOIMALAT

Tuulienergian hyödyntäminen perustuu tuulen kineettisen energian muuntamiseen sähköenergiaksi generaattorin avulla. Tuulen kineettiseen energiaan liittyvä tehon lauseke voidaan johtaa tarkastelemalla pinta-alan A lävistävää ilmavirtausta. Kun tunnetaan tuulennopeus v ja ilmatiheys ρ , voidaan A :n ajassa dt lävistävälle massavirtaukselle johtaa lauseke $\frac{dm}{dt} = \rho Av$. Toisaalta teho on määritelty energian muutoksena aikayksikköä kohden, jolloin edellä esitetyn massavirtauksen avulla tuulen teholle saadaan kaavan 1 mukainen yhtälö. [8, s. 161–162]

$$P_{\text{tuuli}} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

Tuulivoimala ei kuitenkaan pysty hyödyntämään tuulen tehoa täysimittaisesti johtuen tuulen virtausmekaanisista ominaisuuksista. Ilmavirtauksen tulee olla jatkuvaa, jolloin tilanne, jossa ilmassa luovuttaisi kaiken liike-energiansa tuulivoimalan turbiinille on mahdoton. Tuulivoimalan tehoa voidaan siis kuvata paremmin lisäämällä kaavaan 1 hyötysuhdekerroin C_p , joka kuvaa tuulivoimalan kykyä ottaa talteen tuulen energiaa. Perinteisesti teoreettisena ylärajana C_p :lle on pidetty Betzin lain mukaista, 59 %:a tuulen tehosta. [8, s. 22] Käytännössä tuulivoimalan hyötysuhde jää useasti kuitenkin 50 %:n tienoille. Osa teoreettisesta maksimienergiasta kuluu esimerkiksi generaattorin lämpöhäviöihin sekä ilmavirtauksen pyörteisyyteen. Lisäksi Betzin lain johtaminen sisältää idealisointeja, jotka vääristävät tulosta. [9]

Itse energiamuunnoksen tarkastelu suoritetaan tässä työssä läpikäymällä muunnoksen kannalta merkittäviä tuulivoimalan komponentteja. Tuulivoimalan rakennetta ja sen keskeisiä komponentteja on esitelty kuvassa 1. Kuvassa roottorilla tarkoitetaan lapojen ja navan muodostamaa kokonaisuutta sekä käsitettä turbiini käytetään tuulivoimalan synonyminä [8, s. 146]. Energiamuunnoksen tarkastelu alkaa luonnollisesti tuulen kineettisestä energiasta ja päättyy roottorin mekaanisen energian kautta sähköenergiaan.



Kuva 1. Periaatteellinen kuvaus tuulivoimalan rakenteesta, muokattu lähteestä [10].

Tuulen kineettisen energian muuntaminen mekaaniseksi energiaksi tapahtuu lapaan kohdistuvan nostovoiman aiheuttaman momentin kautta. Nostovoiman syntyminen perustuu puolestaan lavan siipimäiseen muotoiluun sekä sen asentoon suhteessa ilmavirtaukseen. Näiden tekijöiden summana, ohittavan ilmavirtauksen nopeus eriytyy lavan ylä- ja alapuolella. Nopeusero aiheuttaa Bernoullin lain mukaisesti alipaineen lavan yläpuolelle sekä ylipaineen lavan alapuolelle, jolloin lapa kokee nostovoiman paine-eron seurauksena. Nostovoiman lisäksi lapa kokee vastusvoiman, ilmanvastuksen seurauksena. [8, s.162–163][9]

2.1 Sähkömagneettinen tausta

Roottorin momentti siirretään seuraavaksi pääakselin ja vaihdelaatikon kautta generaattorin akselille. Vaihdelaatikon avulla roottorin suhteellisen hidas pyörimisnopeus nostetaan generaattorin kannalta otolliseksi. Vaihdelaatikko voidaan jättää myös pois, jolloin generaattori sovitetaan toimimaan hitaammilla pyörimisnopeuksilla. Vaihdelaatikon poistaminen parantaa usein tuulivoimalan toimintavarmuutta, koska se on yksi tuulivoimalan viikaherkimmistä komponenteista johtuen sen voimakkaista mekaanisista rasitteista. [8, s. 146–147]

Generaattorin tehtävänä on muuntaa roottorin mekaaninen energia sähköenergiaksi. Sen keskeisimmät komponentit ovat staattori ja roottori, joista roottori on yhdistetty pääakseliin joko suoraan tai vaihteiston välityksellä. Roottorissa on generaattorityypistä riippuva magnetointi, joka synnyttää pyöriessään generaattorin sisälle ajan ja paikan suhteen muuttuvan magneettivuon. Staattori puolestaan koostuu paikallaan pysyvistä käämityksistä, joiden päät on liitetty generaattorin ulostulon napoihin. Roottori on sijoitettu

staattorin sisälle, jolloin sen aiheuttama muuttuva magneettivuo indusoi jännitteen staattorin napoihin. [8, s. 147–148] Jännitteen indusoituminen perustuu sähkömagneettiseen induktioon ja se voidaan mallintaa Faradayn lailla. Matemaattisesti induktio voidaan esittää kaavan 2 avulla

$$e = - \oint \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot \vec{ds} \quad (2)$$

jossa \vec{B} on magneettivuon tiheyden vektorikenttä ja \vec{ds} tutkittavan pinnan normaalin suuntainen pinta-ala-alkio [11, s. 286–287]. Kaavan 2 miinusmerkki on seurausta Lenzin laista [11, s. 283].

2.2 Generaattorikonseptit

Tuulivoimaloissa yleisimmin käytettyjä generaattoreita ovat tahtigeneraattori sekä epätahtigeneraattori. Näitä generaattoreita käytetään tuulivoimaloissa usein suuntaajakäytön kanssa, jolloin roottorin pyörimisnopeudelle voidaan sallia laajempi vaihteluväli. Roottorin pyörimisnopeuden mukauttaminen vallitsevaan tuulennopeuteen mahdollistaa roottorin aerodynaamisen hyötysuhteen maksimoinnin. [8, s. 148–154] Tämä puolestaan kasvattaa voimalan kokonaishyötysuhdetta, jolloin voimalan kyky hyödyntää tuulen energiaa paranee. Turbiinin roottorin pyörimisnopeuden muuttamiseen kykeneviä voimaloita kutsutaan muuttuvanopeuksisiksi tuulivoimaloiksi.

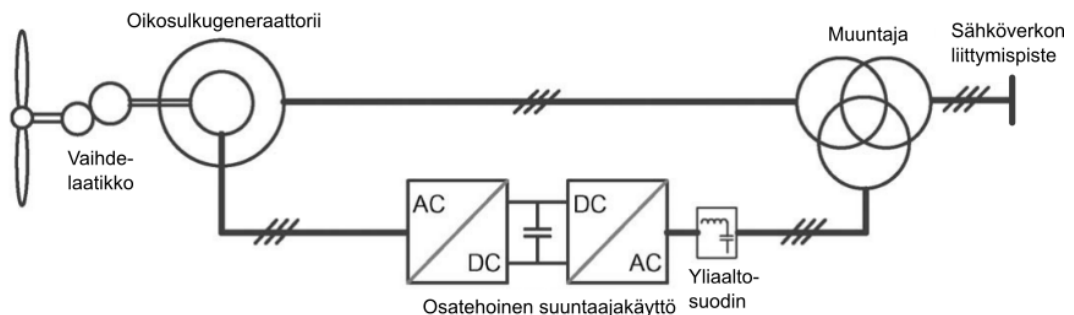
Oikosulkugeneraattoreita käytetään usein osatehoisen suuntaajakäytön kanssa, jolloin tuulivoimalasta käytetään nimitystä kaksoissyötetyn epätahtigeneraattorin tuulivoimala (DFIG, Doubly Fed Induction Generator). Voimalatyyppin nimitys on seurausta siitä, että DFIG-voimalan suuntaajakäyttö on yhdistetty liukurenkailla generaattorin roottoriin, jolloin turbiinin sähköteholle syntyy kaksi erillistä syöttöreittiä. Mikäli suuntaaja on mitoitettu esimerkiksi 30 %:lle generaattorin nimellistehosta, mahdollistaa se roottorille saman suuruusluokan poikkeaman staattorin määrittämästä tahtinopeudesta. Hyötysuhteen optimoinnin lisäksi, suuntaaja kompensoi oikosulkugeneraattorin magnetoinnin kuluttaman loistehon sekä mahdollistaa verkkoon syötetyn tehon tehokertoimen hallinnan. Suuntaaja poistaa myös tarpeen erilliseen pehmeäkäynnistimeen, joka perinteisesti tarvitaan rajoittamaan oikosulkugeneraattorin merkittävää käynnistysvirtaa. [8, s. 157]

Tahtigeneraattori on puolestaan usein yhdistetty täystehoiseen suuntaajakäyttöön, joka mahdollistaa roottorin pyörimisnopeudelle vapaan vaihteluvälin. Tämän lisäksi tahtigeneraattorin magnetointi ei kuluta loistehoa, jolloin kompensoinnin tarve poistuu. [8, s. 148, 158–159] Suuntaajakäyttö mahdollistaa myös roottorin magnetoinnista riippumattoman tehokertoimen hallinnan, jolloin tuulivoimala voi osallistua sähköverkon jännitteen säätöön verkon normaalitilan lisäksi myös vikatilanteissa [12, s. 17].

Tahtigeneraattorin magnetointi on toteutettu joko kestmagneeteilla tai erillisellä magnetointikäimityksellä. Kestomagnetointi parantaa generaattorin kokonaishyötysuhdetta ja pienentää nasellin painoa, verrattuna erillisellä magnetointikäimityksellä toteutettuun generaattoriin. [8, s. 148][13, s. 709] Kestomagnetoinnin ongelmana on kuitenkin siihen tarvittavien maametallien saatavuus ja korkea hinta [13, s. 709].

2.3 Verkkoiliitäntä

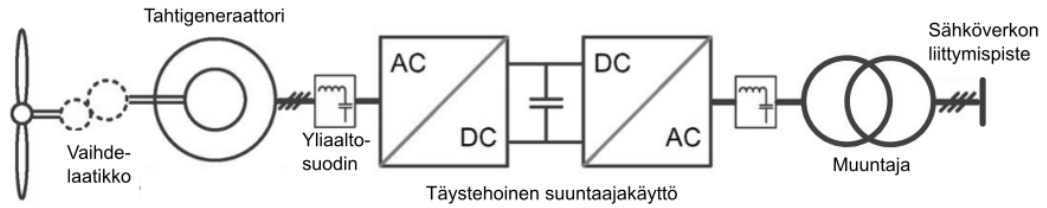
Tuulivoimalan verkkoliitäntä koostuu yksinkertaistetusti muuntajasta sekä tarvittavasta määrästä katkaisijoita ja yliaalto-suodattimia. Muuntajan tehtävänä on nostaa tuulivoimalan jännite verkon vaatimalle tasolle ja näin mahdollistaa esimerkiksi liittyminen keskijänniteverkkoon. Katkaisijoiden roolina on suojata vikatilanteissa sekä voimalan komponentteja, että verkkoa johon voimala on kytketty. Tämän lisäksi katkaisijat mahdollistavat tuulivoimalan huoltamisen. Suuntaajakäyttöjen tehoelektroniikka tuottaa harmonisia yliaaltoja tuulivoimalan jännitteeseen, jolloin yliaalto-suodattimien käyttö mahdollistaa verkkoliitäntää koskevien sähkölaadun reunaehtojen täyttämisen. Kuvassa 2 on esitelty DFIG-tuulivoimalan rakennetta sekä verkkoliitäntää. Katkaisijaa ei ole piirretty kuvaan, mutta se sijoittuisi sekä muuntajan ensiö- että toisiopuolelle. [9]



Kuva 2. DFIG-tuulivoimalan rakennekaavio, muokattu lähteestä [13, s. 711].

Tuulivoimaloilta vaaditaan kykyä osallistua verkon stabiiliuden tukemiseen myös sähköverkon vikatilanteissa. Tämä puolestaan aiheuttaa esteen DFIG-tuulivoiman liittämiskelpoisuudelle, sillä sen kyky osallistua verkon stabiiliuden ylläpitoon lisäämällä loisteho tuotantoa, on rajallinen. Ratkaisuna tähän ongelmaan DFIG-voimalan yhteydessä voidaan käyttää erillistä loistehoa tuottavaa laitetta kuten STATCOM:ia (Static Synchronous Compensator). [12, s. 16, 24]

Kuvassa 3 on puolestaan esitelty tahtigeneraattoriin perustuvan tuulivoimalan rakennetta ja verkkoliitäntää.



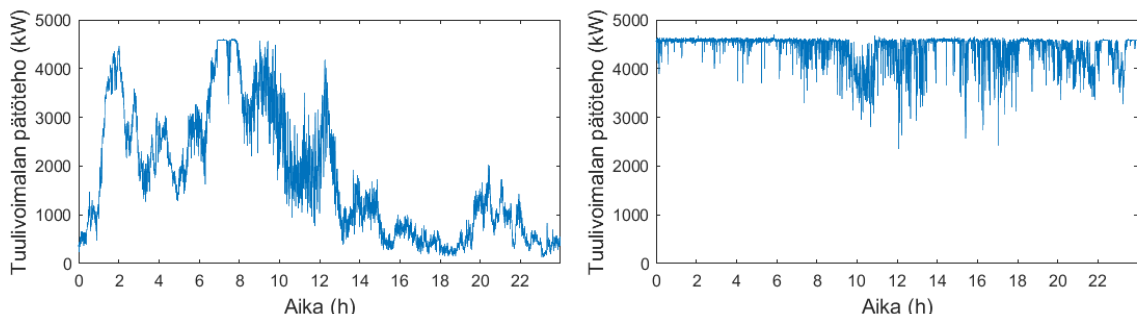
Kuva 3. Tahtigeneraattoriin perustuvan tuulivoimalan rakennekaavio, muokattu lähteestä [13, s. 711].

Mikäli tahtigeneraattorin napalukua kasvatetaan, voidaan vikaherkästä vaihdelaatikosta luopua [8, s. 148, 158]. Tämän seurauksena kuvan 3 vaihdelaatikko on piirretty katkoviivalla.

2.4 Tarkasteltava tuulivoimala

Työssä myöhemmin suoritettava energiavaraston mitoittaminen tapahtuu hyödyntämällä esimerkkituulivoimalan tuotantokäyrää. Esimerkituulivoimalana toimii Nordex N-149/4.0–4.5, joka sijaitsee Länsi-Suomessa, Närpiön Hedetissä. Tuulivoimalan kokonaiskorkeus on 210 metriä ja se on osa 18 voimalan tuulivoimapuistoa. Voimalan naselin mittaustilanteen määrittämä tuulennopeuden keskiarvo vuosien 2019–2021 välillä oli noin 6,48 m/s. Voimalan nimellisteho on 4,5 MW ja se on DFIG-tyypin tuulivoimala. [14][15]

Mitoitusaineisto koostuu kahden tammikuisen tuotantovuorokauden pätötehoikäyrästä ja aineiston näytteenottoväli on 20 sekuntia. Ensimmäisen tuotantovuorokauden aikana voimala toimi pääasiassa osatehoisena eli nimellistehonsa alapuolella ja toisena nimellistehonsa lähetyillä, jolloin mitoittamiseen saadaan referenssi erityyppisistä tuotantovuorokausista. Selkeyden vuoksi ensimmäiseen tuotantovuorokautteen viitataan tässä työssä A:na ja toiseen B:nä. [16]



Kuva 4. Tuotantovuorokausien pätötehoikäyrät (A tuotantovuorokauden pätötehoikäyrä vasemmalla ja B:n oikealla), data lähteestä [16].

Kuvasta 4 nähdään että tuulivoimalan tuotanto on ollut jatkuvaa, eikä sitä ole jouduttu keskeyttämään esimerkiksi huonojen tuuliolosuhteiden tai huoltokatkojen takia.

3. ENERGIAVARASTOT

Tuulivoiman osuus sähköntuotannossa on kasvanut merkittävästi viimeisen 20 vuoden aikana. Esimerkiksi sekä Saksassa että Iso-Britanniassa tuulivoiman osuus on kasvanut noin 20 prosenttiyksikköä. [17] Voimakkaan kasvun seurauksena tuulivoimaan liittyvät tehoheilahtelut aiheuttavat yhä enemmän ongelmia sähköverkon stabiiliudelle sekä luotettavuudelle [18, s. 1]. Näitä haasteita ovat esimerkiksi verkon taajuuden hallinta ja jännitesäädön toteuttaminen sekä verkon komponenttien ylikuormittuminen muuttuvassa tuotantotilanteessa [4, s. 1520]. Tuulivoimaloiden nopeat tehoheilahtelut liittyvät pääasiassa tilanteisiin, joissa tuulivoimala toimii osatehoisena [19, s. 212]. Tämä on seurausta siitä, että megawattiluokan tuulivoimaloiden tehon rajoittamiseen käytettävä lapakulmasäätö alkaa vaimentamaa myös tehovärähtelyjä, kun voimalan nimellisteho ylitetään [20, s. 52].

Toisaalta pitkän aikavälin tehotasapainon säilyttämisen kannalta olisi mielekästä, että tuulivoimalan tuottamaa sähköenergiaa voitaisiin varastoida myöhempää kulutusta varten. Mahdollisuus varastoida energiaa pienentäisi myös tuotantoennustevirheestä syntyvää myyjän tasepoikkeamaa, jolloin tuulienergian myyjä välttäisi ainakin osan tasesähkökaupasta syntyvistä kustannuksista [21, s. 1]. Yhtenä ratkaisuna edellä esitettyihin ongelmiin on energiavarastojen käyttö tuulivoiman yhteydessä [18, s. 1]. Energiavarastot voidaan jakaa karkeasti niiden käyttötarkoituksen mukaan teho- ja energiatyyppeihin varastoihin [6, s.163].

3.1 Teknologian nykytila

Nykyisin käytettyjä energiatyypin varastoja ovat esimerkiksi pumppuvesivoima, paineilma- varasto sekä useat akkuihin perustuvat teknologiat [6, s. 163]. Pumppuvesivoimassa ylimääräinen sähköenergia muunnetaan veden potentiaalienergiaksi pumppaamalla vettä ala-altaasta korkeammalla sijaitsevaan yläaltaaseen. Yläaltaaseen pumpattu vesi voidaan tarvittaessa laskea takaisin ala-altaaseen generaattorin kautta, jolloin veden potentiaalienergia saadaan muunnettua takaisin sähköenergiaksi. [22, s. 749] Paineilma- varaston toiminta eroaa pumppuvesivoimasta siinä, että varastointi tapahtuu potentiaalienergian sijaan kompressoimalla ilmaa säiliöön [23, s. 897]. Pumppuvesivoiman ja paineilma- varaston etuja ovat suuri varastointikapasiteetti sekä elinkaaren puitteissa rajoittamaton syklien määrä. Pumppuvesivoiman heikkoutena on puolestaan sen vaatiman allasysteemin sidonnaisuus maantieteelliseen sijaintiin sekä suhteellisen hidas, minuutitason vasteaika. [6, s. 165] Paineilmavaraston heikkoutena, hitaan vasteajan lisäksi, on

varastoinnissa tapahtuvan lämmönhaihtumisen aiheuttama hyötysuhteen lasku [6, s. 165][23, s. 897].

Akuissa sähköenergian varastointi perustuu kemiallisten reaktioiden hyödyntämiseen [24, s. 512]. Energiavarastoiksi soveltuvia akkuteknologioita ovat lyijyhappoakku, virtausakku, natrium-rikki-akku sekä litiumakku. Edellä esitetyistä teknologioista virtausakulla on suurin mahdollisten lataus-purkaus-sykliden määrä ja lyijyhappoakulla puolestaan huonoin. Litiumakkujen sekä natrium-rikki-akkujen energiatiheys on kuvattujen teknologioiden paras. Kaikille edellä kuvatuille akuille on ominaista sekuntiluokan vasteaika sekä lataus-purkaus-sykliden rajoittuminen parhaassakin tapauksessa noin 10 000 sykliin. [6, s. 165] Lisäksi akkujen käyttöön ja elinkaareen liittyy merkittäviä ympäristö- sekä vastuullisuuskysymyksiä, jotka koskevat esimerkiksi raaka-aineiden hankintaa sekä akkujen kierrätystä [6, s. 165][25, s. 1].

Tehotyyppejä energiavarastoja ovat muun muassa kondensaattori, sähkömagneettinen energiavarasto (SMES, Superconducting Magnetic Energy Storage) ja vauhtipyörä [6, s. 163]. Kondensaattorissa sähköenergia varastoidaan kondensaattorin sähkökenttään [26, s. 151]. Sähkömagneettisessa energiavarastossa sähköenergia varastoidaan puolestaan suprajohtavassa tilassa olevan käämityksen magneetikenttään [26, s. 159–160]. Sekä kondensaattorin että sähkömagneettisen varaston energiatiheys on pieni. Toisaalta niiden alle sekuntitason vasteaika on erittäin hyvä verrattuna esimerkiksi pumpu-vesivoimaan. Lisäksi mahdollisten lataus-purkaus-sykliden määrä on moninkertainen, verrattuna edellä esiteltyihin akkuteknologioihin. [6, s. 165] Vauhtipyörää ei käsitellä tässä yhteydessä, vaan sen toimintaan ja ominaisuuksiin palataan luvussa 4.

Edellä suoritetun tarkastelun pohjalta voidaan todeta energiatyyppisten varastojen sopivan hyvin etenkin tehotasapainon ylläpitoon sekä tasepoikkeaman korjaamiseen. Lisäksi akkuihin perustuvat energiavarastot kykenevät lyhyen vasteaikansa takia myös nopeiden tehoheilahtelujen tasaamiseen. Tehotyypiset energiavarastot sopivat puolestaan suhteellisen pienen amplitudin ja lyhyen aikavälin tehoheilahtelujen tasaamiseen, joihin niiden suuresta tehotiheydestä, nopeasta vasteajasta sekä suuresta mahdollisten lataus-purkaus-sykliden määrästä. Edellä suoritettu tarkastelu myös osoittaa, ettei yksittäinen varasto pysty useinkaan vastaamaan eri aikaskaaloilla tapahtuviin tehoheilahteluihin, jolloin useamman energiavarastoteknologian yhteiskäyttö hybridien energiavarastona on mielekäs vaihtoehto. [6, s. 163]

3.2 Energiavarastojen mitoittaminen

Energiavaraston mitoittaminen on luontaista aloittaa tarkastelemalla sen sijoituskohteena olevaa tuulivoimalaa sekä tapaa, jolla energiavarasto liitetään voimalan yhteyteen. Kaavan 1 seurauksena voimalan tehoheilahteluiden amplitudit suurentuvat tuulen nopeuden kasvaessa, jolloin energiavaraston teho sekä kapasiteetti ovat myös riippuvaisia tuulivoimalan tehosta [19, s. 212]. Mikäli tuulivoimala on osa yhden yhteisen verkkoliittymän omaavaa tuulivoimapuistoa, voidaan energiavarasto sijoittaa keskitetysti esimerkiksi verkkoliittymän kiskoon. Toinen vaihtoehto on sijoittaa energiavarastoja hajautetusti yksittäisten tuulivoimaloiden yhteyteen. [6, s. 163] Keskitettyyn energiavarastoon kohdistuvia vaatimuksia voidaan keventää lisäämällä puiston voimaloiden määrää ja hajauttamalla ne maantieteellisesti, jolloin yksittäisten voimaloiden tehoheilahtelut vaimenevat niiden kompensoidessa toisiaan yhteisessä verkkoliittymässä [6, s. 164][27 s. 3431].

Seuraavaksi energiavaraston mitoittamisessa on syytä määritellä varaston tarkka käyttötapa ja siitä seuraavat suorituskykyvaatimukset. Käyttötapaan liittyviä kysymyksiä ovat esimerkiksi energiavaraston käytön aikaskaala, kompensoitavien tehoheilahteluiden amplitudit sekä mahdollinen useamman energiavaraston yhteiskäyttö. Suorituskykytekijöitä ovat muun muassa vasteaika, purkausnopeus, kapasiteetti ja maksimiteho [6, s. 165]. Kun nämä vaatimukset on saatu määritettyä, voidaan valita yksi tai useampi mitoituskohteen tekniset reunaehdot täyttävä energiavarastoteknologia tarkempaa arviointia varten. [7, s. 141]

Kun mahdolliset energiavarastoteknologiat on saatua valittua, täytyy mitoittamisessa seuraavaksi huomioida energiavaraston ohjausalgoritmin vaikutus. Ohjausalgoritmin tehtävänä on hallita energiavaraston lataustasoa sekä vaimentaa määritellyn amplitudin ja taajuuden tehovaihtelut mahdollisimman tehokkaasti [19, s. 212]. Energiavarastojen yhteydessä käytetyt algoritmit perustuvat esimerkiksi suodattamiseen, voimalan tehon muutosnopeuteen tai liukuvan keskiarvon käyttöön [5, s. 223][6, s. 165]. Esimerkiksi liukuvaan keskiarvoon perustuvassa ohjauksessa hyödynnetään tuotannon historia-arvoja, jolloin ohjausalgoritmin määrittämä referenssiteho voi nousta optimaalisen ratkaisun kannalta liian korkeaksi. Tämä voi puolestaan johtaa tarpeeseen kasvattaa energiavaraston kapasiteettia. [5, s. 223]

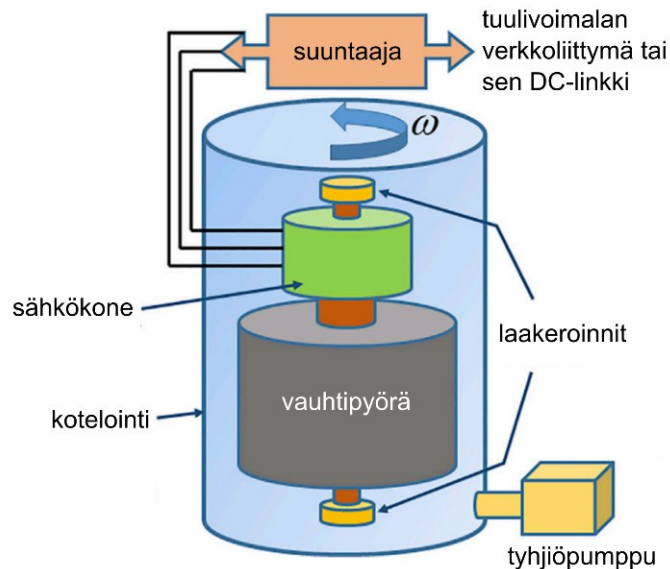
Ennen lopullista valintaa on vielä aiheellista suorittaa teknistaloudellinen vertailu reunaehdot täyttävälle energiavarastoteknologioille. Vertailu voidaan suorittaa laskemalla kunkin energiavarastoteknologian elinkaaren kokonaiskustannukset, joihin vaikuttavat esimerkiksi rakentamis-, käyttö- sekä huoltokustannukset. [7, s. 143] Tämän lisäksi myös strategisten tavoitteiden huomiointi on aiheellista ennen lopullista valintaa.

4. VAUHTIPYÖRÄ ENERGIAVARASTONA

Vauhtipyöräenergiavarastossa sähköenergia varastoidaan sen pyörivän massan liike-energian avulla ja se on yksi vanhimmista energiavarastoteknologioista [28, s. 477–478]. Sen etuja ovat muun muassa nopea vasteaika, korkea tehoteho, hyvä 80–95 %:n hyötysuhde, pitkä käyttöikä sekä ympäristöystävällisyys verrattuna esimerkiksi akkuihin [6, s. 165][29, s. 1][30, s. 2299]. Vauhtipyöräenergiavaraston heikkouksia ovat puolestaan korkea hinta, pyörivään massaan liittyvät turvallisuuskysymykset sekä verrattain nopea varastoidun energian itsestään purkautumisnopeus [6, s. 165][31, s. 7, 10]. Vauhtipyörän jo käytössä olevia sekä tutkittuja sovelluskohteita löytyy energiasektorin lisäksi esimerkiksi UPS-laitteista, autoteollisuudesta sekä merenkulusta [29, s. 6].

4.1 Vauhtipyöräenergiavaraston rakenne ja toimintaperiaate

Vauhtipyöräenergiavaraston rakenteen ja toimintaperiaatteen esittely suoritetaan kuten luvun 2 tuulivoimalan kohdalla, eli käymällä läpi vauhtipyöräenergiavaraston komponentteja sekä niiden rooleja. Tyypillisen vauhtipyöräenergiavaraston rakennetta on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Vauhtipyöräenergiavaraston rakenne, muokattu lähteestä [32, s. 1395].

Vauhtipyöräenergiavaraston komponenttien läpikäynti on luonnollista aloittaa itse vauhtipyörästä, sillä se mahdollistaa energian varastoinnin. Muodoltaan vauhtipyörä muistuttaa usein sylinteriä, levyä tai vannetta ja se on yleensä valmistettu metalista tai komposiitista [29, s. 2, 8][31, s. 9].

4.1.1 Vauhtipyörä

Vauhtipyörässä energia varastoidaan pyörimisliikkeen kineettiseksi energiaksi, jolloin varastoitu energia E voidaan laskea kaavan 3 avulla

$$E = \frac{1}{2}I\omega^2 \quad (3)$$

missä I on vauhtipyörän hitausmomentti ja ω sen kulmanopeus [29, s. 2]. Kaavasta 3 nähdään että varastointikapasiteetin kannalta olisi mielekäästä, mikäli vauhtipyörän pyörimisnopeutta voitaisiin kasvattaa. Kulmanopeutta ei kuitenkaan pystytä muokkaamaan mielivaltaisesti, sillä vauhtipyörässä käytetyn materiaalin vetolujuus rajoittaa nopeuden kasvattamista. [33, s. 239]

Kun vauhtipyörässä käytetyn materiaalin rakenteelliset rajoitteet huomioidaan, voidaan materiaalille määrittää energiatiheys [J/kg] kaavan 4 avulla

$$e_m = K \frac{\sigma_m}{\rho_m} \quad (4)$$

jossa K on vauhtipyörän muotokerroin, ρ_m valmistusmateriaalin tiheys ja σ_m vauhtipyörän kestävä maksimirasitus [28, s. 479]. Maksimirasitus määräytyy vauhtipyörän kestämän maksimikulmanopeuden kautta ja on täten riippuvainen muun muassa edellä mainitusta materiaalikohtaisesta vetolujuudesta [31, s. 9]. Muotokerroin K saa korkeintaan ykkösen suuruisia arvoja ja se määräytyy vauhtipyörän geometriasta. Esimerkiksi yhtenäisen levyn tapauksessa muotokerroimen arvo on 0,606 ja reunoilta supistetun levyn kohdalla 1. [33, s. 239] Valitettavasti muotokerrointakaan ei voida valita vapaasti, sillä monimutkainen geometria aiheuttaa haasteita vauhtipyörän valmistuksessa ja käytön aikaisessa hallinnassa [29, s. 8]. Esimerkiksi teräksen maksimienergiatiheys on 0,19 MJ/kg eli 50 Wh/kg ja hiilikuidun (T1000) 1,28 MJ/kg eli 350 Wh/kg [33, s. 240].

Hiilikuitukomposiittia voisi pitää ylivoimaisena valintana vauhtipyörä käyttöön johtuen sen korkeasta energiatihydestä. Komposiittimateriaalit ovat kuitenkin huomattavasti terästä kalliimpia ja ne vaativat usein energiatihyettä laskevan metallisen akselin. Lisäksi teräksen etuja ovat parempi lämmönjohtavuus sekä tuntemus sen elinkaaresta. Näiden tekijöiden seurauksena teräksestä on tullutkin varteen otettava vaihtoehto etenkin niissä sovelluskohteissa, joissa sen suuremman tiheyden aiheuttamasta laitteiston massan kasvusta ei ole haittaa. [29, s. 2, 8]

4.1.2 Sähkökone ja suuntaaja

Sähkökoneen on tarkoitus toimia vauhtipyöräenergiavarastossa rajapintana kineettisen- ja sähköenergian välillä. Tämä voidaan saavuttaa sähkökoneella, joka kykenee sekä generaattori että moottoritoimintaan. Moottoritoiminta mahdollistaa energian varastoinnin vauhtipyörän kiihdyttämisen kautta ja generaattoritoiminta energian purkamisen vauhtipyörästä. [28, s. 479] Yleisimmin vauhtipyöräenergiavarastoissa käytetty sähkökone on kestopagneettitahtikone (PMSM, Permanent Magnet Synchronous Motor), mutta myös muita sähkökoneita kuten oikosulkukoneita sekä reluktanssikoneita käytetään usein [29, s. 4][34].

Kestomagneettitahtikoneen etuja ovat korkea hyötysuhde ja energiatiheys sekä pienet roottorihäviöt [28, s. 479]. PMSM:n heikkouksia ovat taas siinä käytettyjen kestopagneettien magneettisuuden heikentyminen, korkea hinta ja häiriöalttiimpi rakenne verrattuna esimerkiksi reluktanssikoneeseen [29, s. 4]. Sekä oikosulku- että reluktanssikoneen hyötyihin kuuluu puolestaan yksinkertainen rakenne sekä kalliiden kestopagneettien käyttötarpeen poistuminen. Näiden koneiden kokonaishyötysuhde on kuitenkin PMSM:ää huonompi. Lisäksi reluktanssikone vaatii monimutkaisemman ohjauksen ja se on vielä suhteellisen kehittämätön teknologia. [29, s. 5][35, s. 253]

Suuntaajan tehtävänä on puolestaan toimia sähkökoneen ja ulkoisen verkon välisenä liittymänä. Tyypillisesti vauhtipyöräenergiavarastojen yhteydessä käytetään DC-AC-DC suuntaajia (BTB, Back-To-Back), jotka kykenevät sekä invertteri- että tasasuuntaustoi- mintaan. [29, s. 5] Vauhtipyörä saadaan suuntaajan avulla itsenäiseksi verkon taajuudesta, jolloin energiavarastotoiminnan kannalta välttämätön vauhtipyörän pyörimisnopeuden muokkaaminen on mahdollista. Tuulivoima sovelluksissa suuntaaja voidaan liittää suoraan tuulivoimalan verkkoliittymän kiskoon [36, s. 918]. Toinen mahdollisuus on käyttää tuulivoimalan oman suuntaajan DC-linkkiä, jolloin vauhtipyöräenergiavaraston suuntaajasta poistuu yksi AC-DC muunnosvaihe [37, s. 20834][38, s. 1075].

4.1.3 Laakerointi ja apujärjestelmät

Laakeroinnin tehtävänä on kannatella vauhtipyörää, mahdollistaa sen pyöriminen sekä vaimentaa sen epätoivotut värähtelyt. Jotta energianvarastointi vauhtipyörän avulla olisi mahdollisimman tehokasta, täytyy sen laakerointiin liittyvät kitkahäviöt minimoida. Alun perin vauhtipyörien yhteydessä käytettiin täysin mekaanista laakerointia, mutta siitä on

myöhemmin siirretty magneetteja hyödyntäviin ratkaisuihin, johtuen mekaanisten laakereiden nopeasta kulumisesta, korkeista kitkahäviöistä sekä voitelu tarpeesta. [28, s. 479][29, s. 3]

Magneettinen laakerointi voidaan toteuttaa esimerkiksi kesto- ja sähkömagneettien yhteiskäytön avulla [28, s. 479–480]. Yksinkertaistetusti kestromagneettien tehtävänä on usein kannatella vauhtipyörän painoa ja sähkömagneettien puolestaan tukea vauhtipyörää sivuttaissuunnassa. Magneettisen laakeroinnin käyttö vaatii kuitenkin kalliin sekä monimutkaisen ohjausalgoritmin ja sähkömagneetit kuluttavat energiaa. [39, s. 15] Tämän seurauksena hybridiratkaisut, kuten mekaanisten ja sähkömagneettisten laakereiden yhteiskäyttö, ovat houkuttelevia vaihtoehtoja [40, s. 477].

Vauhtipyörän koteloinnilla on kaksi päätehtävää, jotka voidaan jakaa turvallisuuden varmistamiseen sekä kokonaisyötysuhteen parantamiseen. Kotelointi pysäyttää vauhtipyörän hajotessa syntyvien lentävien sirpaleiden etenemisen, jolloin vauhtipyörän viikaantuminen ei aiheuta välitöntä vaaraa esimerkiksi sen läheisyydessä oleskeleville ihmisille. [39, s. 15] Tätä turvallisuusominaisuutta voidaan parantaa asentamalla vauhtipyörä koteloineen maan alle, jolloin suojauksesta tulee kaksivaiheinen [41].

Hyötysuhteen parantaminen tapahtuu pienentämällä vauhtipyörän kokemaa ilmavastusta. Ilmanvastuksen pienentäminen onnistuu puolestaan laskemalla kotelossa vallitsevaa painetta tyhjiöpumpun avulla. Paineen laskemisen haittana on kuitenkin vauhtipyöräenergiavaraston lämpöä tuottavien komponenttien jäähtymisen monimutkaistuminen, johtuen matalapaineisemman ilman heikommasta lämmönsiirto kyvystä. Ilmanvastusta voidaan myös pienentää käyttämällä kotelon sisällä tavallisesta ilmasta poikkeavaa kaasuseosta. Kotelointi valmistetaan näiden edellä esitettyjen tehtävien seurauksena yleensä jostain kestävästä materiaalista, kuten paksusta teräksestä. [39, s. 15]

4.2 Vauhtipyörän mitoitus

Mitoittamisen tavoitteena on määrittää vauhtipyöräenergiavarastolta vaadittu maksimiteho ja varastointikapasiteetti. Alaluvusta 3.2 käy ilmi, että energiavaraston mitoittaminen on monivaiheinen sekä useista muuttujista riippuva prosessi, minkä seurauksena samanlainen läpikäynti on kandidaatintyön kannalta liian monimutkainen. Mitoittaminen on täten suoritettu yksinkertaistetusti käyttämällä esimerkkituulivoimalan pätötehoikäyrää, ja lähestymällä ongelmaa täysin teknisistä lähtökohdista. Koska mitoittaminen perustuu suppeaan mittausaineistoon ja on voimakkaasti yksinkertaistettu, voidaan saatua tulosta pitää lähinnä suuntaa antavana. Mitoittamisessa myös lähdetään liikkeelle ajatuksesta,

että energiavaraston tulisi vakioida tuulivoimalan liittymän teho, mikä luonnollisesti nostaa siihen kohdistuvia teho- ja kapasiteettivaatimuksia. Mikäli energiavarastoa käytettäisiin esimerkiksi vain tehon kasvu- tai laskunopeuden rajoittamiseen ja sitä kautta jännitteen laadun parantamiseen, johtaa työssä käytettävä mitoitus tapa todennäköisesti energiavaraston ylityöittämiseen [5, s. 220].

Vauhtipyöräenergiavarastolta vaadittu teho $P_{vp}(t)$ voidaan määrittää kaavan 5 avulla

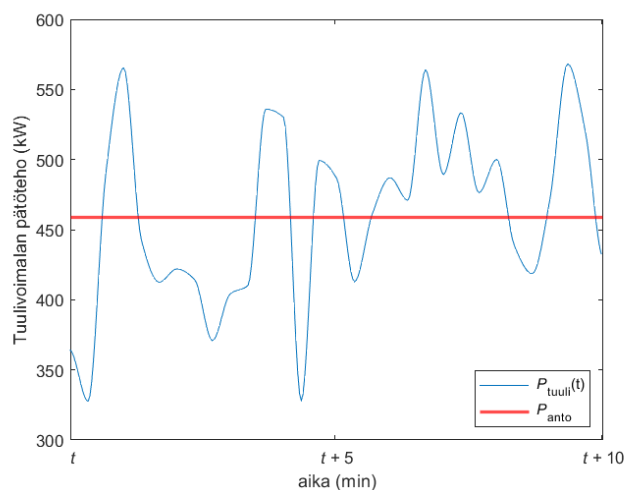
$$P_{vp}(t) = P_{tuuli}(t) - P_{anto} \quad (5)$$

jossa $P_{tuuli}(t)$ on tuulivoimalan hetkellinen pätöteho ja P_{anto} tarkasteluvälistä riippuva vakio teho, jonka tuulivoimala syöttää sähköverkkoon [42, s. 1217]. Mikäli $P_{vp}(t)$:n etumerkki on positiivinen, energiavarastoa ladataan. Toisaalta negatiivinen etumerkki kertoo energiavaraston varauksen purkamisesta.

Vakioteho P_{anto} määritetään tässä työssä siten että energiavaraston lataustaso on sama tarkasteltavan aikavälin alku- ja loppupisteissä, kun energiavaraston kokonaishyötysuhde huomioidaan. Energiavaraston hyötysuhteena käytetään tässä työssä 90%:a [30, s. 2299]. P_{anto} voidaan täten määrittää kaavasta 6

$$\frac{E_{purku}}{E_{lataus}} = \eta \quad (6)$$

jossa E_{purku} on tutkittavalla aikavälillä energiavarastosta purettu energia, E_{lataus} energiavarastoon aikavälillä ladattu energia ja η energiavaraston hyötysuhde. Graafisesti kaava 6 voidaan esittää kuvan 6 avulla. Kuvassa 6 aikavälinä Δt on käytetty 10 minuuttia ja sen käyrämuoto on peräisin esimerkituulivoimalan pätötehoikäyrästä [16].

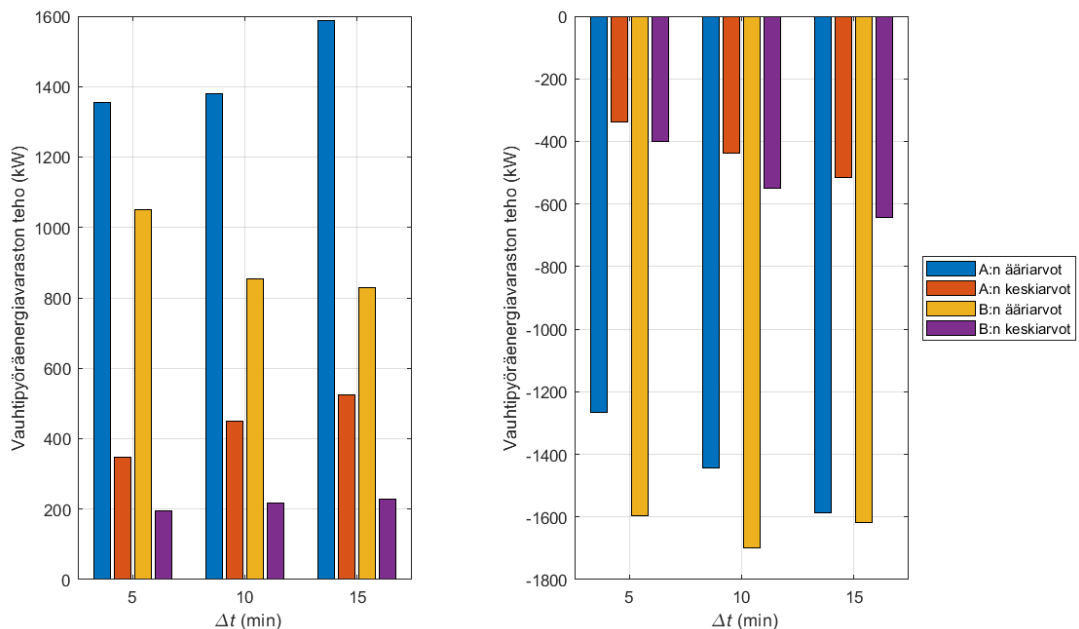


Kuva 6. Esimerkki tuulivoimalan pätötehoikäyrästä sekä optimi antotehosta.

Tuulivoimalan liittymässä näkyvää tehoa P_{anto} kuvaavan punaisen viivan ja sen yläpuolella olevan pätötehoikäyrän rajaama alue vastaa nyt siis kaavan 6 nimittäjää sekä viivan

alapuolelle jäävä rajattu alue kaavan osoittajaa. Johtuen kaavan 6 ratkaisun monimutkaisuudesta, on edellisen kuvan P_{anto} ratkaistu iteratiivisesti liitteessä A esitetyn mitoitusohjelman avulla.

Kun käytettävä P_{anto} on saatu määritettyä, voidaan seuraavaksi ratkaista tutkittavalla aikavälillä esiintyvät energiavaraston maksimi purku- ja lataustehot. Tämä tapahtuu sijoittamalla aikavälille määritetty P_{anto} ja $P_{\text{tuuli}}(t)$ kaavaan 5, sekä ratkaisemalla näin saadun datasarjan ääriarvot. Jotta arvio vaaditusta tehosta tarkentuisi, on samankaltainen analyysi suoritettu sekä A että B tuotantovuorokauden datalle käyttäen useampaa aikavälin Δt arvoa. Analyysin tulokset on esitetty kuvassa 7 ja sen laskennassa on hyödynnetty liitteen A mitoitusohjelmaa. Tehon ääriarvojen lisäksi, kuvassa on esitetty yksittäisten aikavälien tehojen ääriarvoista lasketut keskiarvot, jotta pystyttäisiin arvioimaan paremmin vauhtipyöräenergiavarastolta vaadittavaa tehoa.



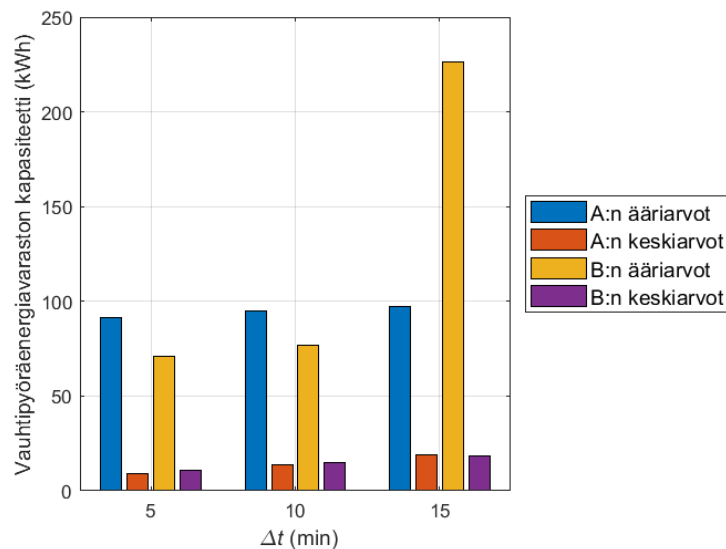
Kuva 7. Vauhtipyöräenergiavaraston tehojen aineistopohjaiset ääriarvot sekä niiden eri aikavälien keskiarvot (vasemmalla lataustehot ja oikealla purkutehot).

Kuvassa esitettyjen ääri- ja keskiarvojen ero on suuri, jolloin tehon valinta johtaa optimointi tehtävään suorituskyvyn ja kustannusten välillä. Ongelman ratkaiseminen on nyt kuitenkin liian monimutkainen prosessi työn laajuuden kannalta, joten tehon mitoittaminen suoritetaan silmämääräisen arvion avulla. Tehoksi valitaan nyt 1 MW, jolloin energiavarasto kykenee vaimentamaan valtaosan tuulivoimalan tehoheilahteluista.

Vauhtipyöräenergiavarastolta aikavälillä vaadittavaa kapasiteettia voidaan puolestaan arvioida kaavan 7 kaltaisella analyysillä

$$E_{\text{vp}} = \frac{P_{\text{vp_maksimi}} \Delta t}{x_{\text{leikkaus}}} \frac{1}{3600} \quad (7)$$

jossa $P_{vp_maksimi}$ on vauhtipyöräenergiavarastolta tutkitulla aikavälillä vaadituista tehon ääriarvoista absoluuttisesti suurempi arvo ja $x_{leikkaus}$ tuulivoimalan pätötehoikäyrän sekä P_{anto} suoran leikkauskohtien lukumäärä samalla aikavälillä. Kaavan vakiokerroin muuntaa tuloksen yksiköt jouleista wattitunneiksi. Vaikka mitoitusaineisto mahdollistaisi myös edellä kuvattua tarkemman analyysin vaaditusta kapasiteetista, voidaan kaavan 7 käyttöä pitää kandidaatintyössä perusteltuna valintana johtuen sen yksinkertaisesta toteutuksesta. Lopullinen arvio vaaditusta kapasiteetista saadaan, kun kaavan 7 esittämä laskenta suoritetaan koko aineistolle käyttämällä useita Δt :n arvoja. Laskennan tulokset on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Vauhtipyöräenergiavaraston kapasiteetin aineistopohjaiset ääri- ja keskiarvot.

Kun tuotantovuorokausi B:n 15 minuutin tarkasteluajavälin poikkeama jätetään huomiotta, voidaan energiavaraston kapasiteetiksi määrittää 100 kWh silmämääräisen arvion avulla (Kuva 8). Valittu kapasiteetti on huomattavasti keskiarvoja suurempi, mutta sitä voidaan pitää perusteltuna valintana johtuen tuulen satunnaisesta luonteesta. Tällä tuulen satunnaisuudella tarkoitetaan nyt siitä, että todellisuudessa vauhtipyöräenergiavaraston purkaus- ja latauskykliä ei voida olettaa olevan vuorottelevia, jolloin liian tiukka mitoitus johtaisi energiavaraston latauksen tyhjenemiseen ja täten suorituskäytön laskuun.

4.3 Tunnuslukujen laskenta

Tunnuslukujen laskemisella tarkoitetaan tässä työssä vauhtipyöräenergiavaraston elinkaaren vuosittaisten kokonaiskustannusten määrittämistä. Tarkastelu suoritetaan vauh-

tipyöräenergiavarastolle, jonka teho sekä kapasiteetti ovat alaluvun 4.2 tulosten mukaisia. Vuosittaiset kokonaiskustannukset C_{VK} määritetään laskemalla yhteen sekä investointikustannusten että elinkaaren jatkuvien kustannusten annuiteetit [43, s. 573]. Annuiteettien laskennassa käytettäväksi korkotasoksi on tässä työssä valittu 8 %:ia ja pitoaikana käytetään 20 vuotta [41][43, s. 587]. Vuosittaiset kustannukset voidaan esittää kaava muodossa yhtälön 8 avulla

$$C_{VK} = C_I + C_{K\&H} + C_K \quad (8)$$

jossa C_I on tutkittavan energiavaraston alkuinvestoinnin annuiteetti, $C_{K\&H}$ käyttö- ja huoltokustannusten annuiteetti ja C_K korvauskustannusten annuiteetti [43, s. 573]. Kokonaiskustannuksissa ei nyt huomioida elinkaaren lopuksi tapahtuvaa energiavaraston materiaalien kierrätystä, johtuen sen hintadatan heikosta saatavuudesta [43, s. 573, 585].

Vauhtipyöräenergiavaraston tapauksesta alun investointikustannukset koostuvat muun muassa sähkökoneesta, vauhtipyörästä ja tehoelektroniikasta [43, s. 572–573]. Euro-määräisenä hintana käytetään nyt Zakerin ja Syrin tutkimuksessa määritettyä markkinaratkaisujen hintojen keskiarvoa, jonka suuruus on tarvittavista sähkö- sekä lisälaitteistoista ja yleiskuluista 302 €/kW:lta sekä itse vauhtipyörästä 2 815 €/kWh:lta [43, s. 572, 590][44]. Kun edellä esitetyt hinnat kerrotaan alaluvussa 4.2 määritetyllä teholla ja kapasiteetilla sekä lasketaan yhteen, saadaan vauhtipyöräenergiavaraston alkuinvestoinnin hinnaksi 583 500 €.

Investointikustannus saadaan jaettua pitoajalle vuosittaiseksi kustannukseksi kertomalla investoinnin kokonaissummaa annuiteettitekijällä [43, s. 573]. Annuiteettitekijä a voidaan puolestaan ratkaista kaavan 9 avulla

$$a = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (9)$$

jossa T on pitoaika vuosina ja i käytetty korkotaso [45, s. 204]. Sijoittamalla pitoaika ja korkotaso kaavaan 9 sekä suorittamalla edellä kuvattu kertolasku, saadaan vuosittaiseksi kustannukseksi laskettua 59 431 €.

Käyttö- ja huoltokustannukset sisältävät puolestaan sekä kiinteät että käytöstä riippuvat vauhtipyöräenergiavaraston operatiiviset kustannukset [43, s. 573]. Jo edellä käytetyn Zakerin ja Syrin tutkimuksen mukaan vuosittaisten käyttöön ja huoltoon liittyvien kiinteiden kustannusten keskiarvo on 5,2 €/kW:lta ja muuttuvien kustannusten 2 €/MWh:lta [43, s. 590][44]. Muuttuvat kustannukset on nyt ilmoitettu suhteessa energiavaraston käsittelemään energiaan, jolloin sen arviointi vaatisi laajemman aineiston vauhtipyöräenergiavaraston käyttäytymisestä [43, s. 573]. Tämän seurauksena muuttuvat kustannukset jätetään tässä työssä kustannusten laskemisesta pois. Poisjätö ei myöskään

merkittävästi vääristä luvussa 5 tapahtuvaa vertailua litiumakun kanssa, johtuen samasta käyttökohteesta ja lähes yhtä suuresta muuttuvien kustannuksien hinnasta (2,1 €/MWh) [43, s. 591]. Näin ollen vuotuiseksi käyttö- ja huoltokustannukseksi saadaan määritettyä 5 200 €.

Kolmas ja viimeinen kustannuskomponentti C_K muodostuu vauhtipyöräenergiavaraston tapauksessa esimerkiksi tyhjiöpumpun tai laakeroinnin vaihdosta [43, s. 579]. Sen keskiarvon euromääräinen suuruus on nyt 151 €/kW:lta ja toistuvuus joka 4. vuosi [43, s. 590]. Kun tämä korvauskustannus jaetaan neljälle vuodelle edellä käsitellyllä annuiteettimenetelmällä, saadaan korvauskustannusten annuiteetiksi 45 590 €. Kun lasketaan edellä määritetyt kustannuskomponentit yhteen kaavan 8 mukaisesti, pystytään alaluvussa 4.2 mitoitettun vauhtipyöräenergiavaraston vuosittaisiksi kokonaiskustannuksiksi määrittämään 110 221 €.

Saatuun tulokseen on hyvä suhtautua kriittisesti, johtuen useista kustannusten määrittämiseen liittyvistä epävarmuustekijöistä. Ensinnäkin itse hintadatan saatavuus voi olla puutteellista, johtuen markkinoiden kehittymättömyydestä. Lisäksi muun muassa datan skaalaaminen eri tehotasoille sekä sen keräämisessä käytetyt menetelmät, voivat johtaa vääristymiin. [43, s. 573] Myös komponenttien hintakehitys luo merkittävän epävarmuustekijän analyysille, koska tässä työssä käytetyt hintatiedot perustuvat vuoden 2014 tilanteeseen. On myös hyvä ymmärtää, että alaluvussa 4.2 määritetty teho-kapasiteettisuhde ei ole välttämättä teknisesti mahdollinen, jolloin esimerkiksi tehovaatimuksen täyttäminen voi kasvattaa kapasiteettia merkittävästi yli vaaditun tason. Tämä puolestaan vääristää edellä suoritettua kapasiteettipohjaista laskelmaa investointikustannuksista.

4.4 Teknologian nykytila

Tässä alaluvussa vauhtipyöräenergiavarastojen nykytila käydään läpi esittelemällä muutamia jo kaupallistettuja ratkaisuja sekä niiden keskeisimpiä ominaisuuksia. Esimerkkiyritysten poiminnassa on hyödynnetty X. Lin ja A. Palazzolon artikkelin koontia vauhtipyöräenergiavarastoja valmistavista ja kehittävästä yrityksistä. Tämän työn tarkasteluun taulukosta on poimittu Hitachi Energy, Stornetic, Piller Power Systems ja Beacon Power. Valinta on tehty sen perusteella, että näiden yritysten tuotteet sopivat parhaiten tuulivoiman tehoheilahteluiden tasaamiseen. [29, s. 7] Tässä alaluvussa kerrotuihin tietoihin esimerkiksi maksimitehoista tulee suhtautua kriittisesti, sillä niiden lähteenä on käytetty valmistajan itse ilmoittamia arvoja.

Beacon Powerin sekä Storneticin vauhtipyöräenergiavarastot hyödyntävät komposiittisia vauhtipyöriä. Molempien yritysten tuotteille on yhteistä myös sähkömagneeteilla toteutettu laakerointi, paineen laskeminen kotelossa sekä mahdollisuus käyttää useita itsenäisiä vauhtipyöräenergiavarastomoduuleita yhtenä isompana energiavarastona. [41][46][47] Vauhtipyöräenergiavarastomoduulilla tarkoitetaan nyt siis kokonaisuutta, joka sisältää vauhtipyörän, sähkökoneen ja muut tarvittavat apujärjestelmät, joiden avulla se kykenee tarvittaessa myös itsenäiseen toimintaan. Beacon Powerin yksittäisen vauhtipyöräenergiavarastomoduulin maksimiteho on tuulivoimasovelluksissa 100 kW ja sen kapasiteetti samassa käyttökohteessa 30 kWh [48, s. 14]. Sen maksimikierronopeus on puolestaan 16 000 kierrosta minuutissa ja sen elinkaareksi on kerrottu yli 100 000 täyttä lataus-purkaus-sykliä. Beacon Powerin energiavaraston täyden lataus-purkaus-syklin hyötysuhteeksi on kerrottu yli 85 %. [48, s. 6, 12]

Storneticilta löytyy puolestaan kaksi eri teholuokan vauhtipyöräenergiavarastomoduulia, joiden maksiminimellistehot ovat 130 ja 60 kW. Näitä tehoja vastaavat kapasiteetit ovat puolestaan 2 kWh ja 2.3 kWh. Molempien mallien huippupyörimisnopeus on 45 000 kierrosta minuutissa sekä niiden elinkaareksi luvataan yli 100 000 täyttä lataus-purkaus-sykliä. Niiden yksittäisen täyden syklin kokonaisyhtösuhte on tyyppillisessä käyttökohteessa 90 %. Sähkökoneena Storneticin energiavarastossa käytetään vauhtipyörille tyyppillistä ratkaisua eli kestopiikkitaitikonetta. [46]

Piller Power Systemsin vauhtipyöräenergiavarasto hyödyntää puolestaan metallista vauhtipyörää ja se on täten huomattavasti Beacon Powerin ja Storneticin tuotteita kookkaampi. Yhteisiä tekijöitä edellä esitettyihin tuotteisiin on kyky yhdistää useita moduuleita sekä magneettisen laakeroinnin käyttö. Sen kapasiteetti on noin 16 kWh ja maksimi antoteho 1 MW. Valmistaja ei kerro suoraan mahdollisten syklien määrää, mutta antaa käyttöajalle yli 20 vuoden arvion. [49]

Viimeisenä esimerkkinä on Hitachi Energyyn hybridienergiavarasto, joka yhdistää 3 MW:n akuston sekä kaksi 1 MW:n vauhtipyöräenergiavarastoa. Energiavaraston vasteajaksi valmistaja ilmoittaa alle 5 millisekuntia, jolloin se soveltuu hyvin juuri sääriippuvan tuotannon tasaamiseen. Tällaisen hybridiratkaisun käyttö lisää myös akuston elinikää, sillä vauhtipyörän käyttö nopeiden tehoheilahteluiden tasaamisessa vähentää akuston lataus-purkaus-syklien määrää. Akkusysteemi suorittaa puolestaan energian pitkäaikaisvarastoinnin ja tekee täten esimerkiksi kulutushuippujen tasaamisesta mahdollista. Näiden ominaisuuksien seurauksena Hitachi Energyyn ratkaisu sopii etenkin mikroverkkoon, jonka tuotanto perustuu suurelta osin sääriippuvan tuotannon käyttöön. [50]

5. TEKNISTALOUDELLINEN VERTAILU

Tässä luvussa suoritetaan teknistaloudellinen vertailu vauhtipyörä- ja akkuenergiavaran-
ton välillä. Vertailtavaksi akkuteknologiaksi on valittu litiumakku, johtuen sen alle sekun-
tiluokan vasteajasta, suuresta mahdollisten lataus-purkaus-sykliden määrästä ja hyvästä
kokonaishyötysuhteesta [6, s. 165][24, s. 519][51, s.133]. Teknistaloudellisuuden vertai-
lun lisäksi luvun lopussa pohditaan lyhyesti energiavarojen ympäristö- ja vastuulli-
suuskysymyksiä.

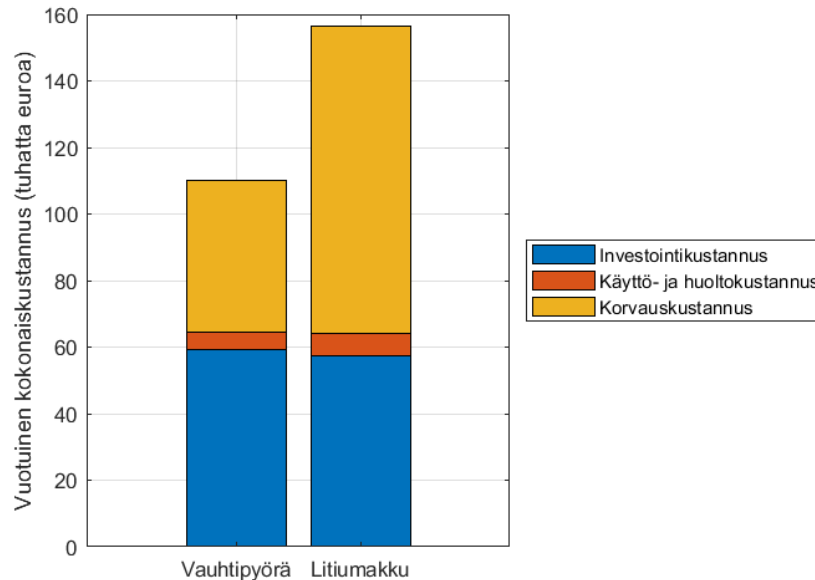
5.1 Akuston tunnuslukujen laskeminen

Tunnuslukujen laskeminen suoritetaan nyt alaluvun 4.3 esittämällä tavalla ja siinä käy-
tetään jälleen alaluvussa 4.2 määritettyä 1 MW:n tehoa sekä 100 kWh:n kapasiteettia.
Investointikustannuksen annuiteetin suuruudeksi saadaan nyt 57 279 €. Laskennassa
on huomioitu hintojen määrittämisessä käytetty rajoite 80 %:n kokonaiskapasiteetin käy-
tölle, jolloin laskennallinen kapasiteetti nousee 125 kWh:in. [43, s. 591] Rajoite on seu-
rausta siitä, että akustojen käyttöikä voidaan kasvattaa rajoittamalla niiden purkausta-
soa [24, s. 513]. Kiinteiden käyttö- ja huoltokustannusten annuiteetin suuruus on nyt
puolestaan 6 900 €. Korvauskustannusten annuiteetiksi saadaan 92 418 €, käyttämällä
5 vuoden toistuvuutta. [43, s. 591] Kun suoritetaan kaavan 8 mukainen yhteenlasku,
saadaan litiumakkuenergiavaran vuosittaiseksi kokonaiskustannukseksi 156 597 €.

Alaluvun 4.3 lopussa mainittujen epävarmuustekijöiden lisäksi on syytä huomioida, että
Zakerin ja Syrin tutkimuksen litiumakuston hintataso on määritetty käyttämällä pääasial-
lisesti MW-luokan energiavaroja, joiden käyttö keskittyy muutamien tuntien aikaska-
lalla tapahtuvien tehomuutosten tasaamiseen [43, s. 591]. Lisäksi korvausinvestointien
toistuvuus olisi todellisuudessa tiheämpi. Tämä on seurausta siitä, että tässä työssä tut-
kittavien nopeiden tehoheilahteluiden tasaaminen vaatisi todellisuudessa suurempaa
vuosittaisten syklien määrää kuin hintojen määrittämisessä oli käytetty [43, s. 586, 591].
Hinnan määrittämisessä käytettyjen syklien määrä voitaisiin kyllä saada vastaamaan pa-
remmin todellisuutta, mikäli osa tehoheilahteluista jätettäisiin kompensoimatta [52, s.
465]. Tämäkin vaihtoehto vääristää kuitenkin tulosta, sillä se vaikuttaisi myös vauhtipyö-
räenergiavarastoon vaatimusmäärittelyyn ja tätä kautta sen kustannuksiin.

5.2 Energiavarastoteknologioiden vertailu

Teknistaloudellinen vertailu aloitetaan taloudellisesta vertailusta, esittämällä sekä vauhtipyörä- että litiumakkuenergiavaraston elinkaaren kokonaiskustannusten annuiteetit kustannuskomponenteittain samassa kuvaajassa (Kuva 9). Kuvaajan lukuarvot ovat peräisin alaluvuista 4.3 ja 5.1.



Kuva 9. Energiavarastojen elinkaaren vuotuiset kokonaiskustannukset.

Kuten kuvasta 9 nähdään, vauhtipyöräenergiavaraston investointikustannukset ovat hieman litiumakuilla toteutettua energiavarastoa suuremmat. Kustannusten rakentuminen on kuitenkin huomattavasti niiden suuruutta eriävämpää, sillä vauhtipyöräenergiavaraston tapauksessa kapasiteettiriippuvaiset kustannukset muodostavat noin puolet kokonaisinvestointikustannuksista ja litiumakuston tapauksessa puolestaan vain noin 20 %:a niistä. On myös hyvä huomioida, että vauhtipyöräenergiavaraston kapasiteettiriippuvaiset investointikustannukset voisivat olla todellisuudessa huomattavasti suuremmat johtuen teknisesti mahdollisista teho-kapasiteetti-suhteista. Esimerkiksi käyttämällä alaluvussa 4.4 esiteltyä Beacon Powerin energiavaraston teho-kapasiteetti-suhdetta, kasvaisi 1 MW:n tehoon kykenevän vauhtipyöräenergiavaraston investointikustannusten annuiteetti 116 774 euroon.

Energiavarastojen käyttö- ja huoltokustannukset ovat likimain yhtä suuria. Korvauskustannuksissa vauhtipyöräenergiavarasto on kuitenkin huomattavasti litiumakkuenergiavarastoa edullisempi. Tämä ero myös kasvaisi, mikäli laskennassa huomioitaisiin alaluvussa 5.1 perusteltu tiheämpi litiumakkuenergiavaraston komponenttien korvausväli. Mikäli korvausinvestointien väli muutettaisiin esimerkiksi 5 vuodesta 2 vuoteen, saataisiin litiumakkuenergiavaraston korvauskustannuksen uudeksi annuiteetiksi 206 924 €.

Edellä esitetyillä korjauksilla vauhtipyöräenergiavaraston kokonaiskustannusten annuiteetiksi saataisiin 167 564 € ja litiumakkuenergiavaraston 271 103 €. Sekä korjatussa että alkuperäisessä kustannuslaskelmassa vauhtipyöräenergiavarasto on taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto. Vertailun tulos on luonnollisesti myös yhtenevä Zakerin ja Syrin tutkimuksen tulosten kanssa, joiden mukaan kokonaiskustannusten annuiteetin keskiarvoksi muodostuu litiumakkuenergiavaraston tapauksessa 433 €/kW:lta ja vauhtipyöräenergiavaraston kohdalla 210 €/kW:lta [43, s. 587]. Taloudellisen vertailun tulos saattaa kuitenkin muuttua lähitulevaisuudessa merkittävästi, sillä litiumakkuihin perustuvien energiavarastoteknologioiden ennustetaan olevan kustannustehokkain ratkaisu useissa sovelluskohteissa vuoteen 2030 mennessä [53, s. 81].

Myös teknisessä vertailussa vauhtipyörä vaikuttaa akustoa paremmalta vaihtoehdolta, kun energiavaraston käyttökohteena on nopeiden tehoheilahteluiden tasaaminen tuuli-voimalan yhteydessä. Ratkaisutekijöinä tarkastelussa voidaan pitää vauhtipyöräenergiavaraston mahdollisten lataus-purkaus-sylikien huomattavasti suurempaa määrää, sen parempaa tehotehiheyttä, hyvää hyötysuhdetta ja nopeaa vasteaikaa [6, s. 165][29, s. 1]. Näiden tekijöiden lisäksi vauhtipyöräenergiavaraston mahdollisten lataus-purkaus-sylikien määrä ei ole riippuvainen käyttölämpötilasta tai sen varauksen purkaustasosta käytönaikana [54, s. 6804].

Lisäksi vauhtipyöräenergiavaraston merkittävänä etuna on ympäristöystävällisyys verrattuna litiumakustoon, sillä sen valmistaminen ei vaadi myrkyllisten kemikaalien käyttöä [29, s. 1]. Vauhtipyöräenergiavarastojen ympäristöystävällisyydestä puhuttaessa on kuitenkin hyvä huomioida, että useat vauhtipyöräenergiavarastot hyödyntävät kestopagneetteja sekä komposiittimateriaaleja, joiden kierrättäminen ei ole vielä saavuttanut vakiintunutta asemaa ja vaatii kehitystyötä [55, s. 43][56, s. 24]. Edellä tehdyt lisähuomiot eivät kuitenkaan nyt vaikuta valintaan energiavarastoteknologioiden välillä, johtuen vauhtipyöräenergiavaraston pidemmästä elinkaaresta ja samankaltaisista haasteista litiumakkujen kohdalla [57, s. 14]. Ympäristöriskien lisäksi kestopagneettien käyttöön liittyy saatavuusriski, johtuen sen tuotannon vahvasta keskittymisestä Kiinaan ja siitä seuraavasta kauppapoliittisesta riskistä [58, s. 23]. Saatavuusriskiä voidaan kuitenkin hallita kehittämällä edellä mainittuja kierrätysmenetelmiä [59].

Vastuullisuustarkastelussa molempiin vaihtoehtoihin liittyy ongelmia, ja paremman valinnan tekeminen vaatisi valitsevalta taholta, itse valinnan lisäksi, aktiivisia toimia ongelmien ratkomiseksi [60, s. 51]. Esimerkiksi vauhtipyöräenergiavaraston kestopagneettien valmistus ja litiumakkujen kobolttin louhinta ovat merkittäviä ihmisoikeusrikkomusten riskin kasvattajia [25, s. 1][61, s. 1586].

6. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT

Ensimmäisenä merkittävänä tulevaisuuden kehityskohteena voidaan pitää itse vauhtipyörän muotoilua ja rakennetta. Muun muassa vauhtipyöräenergiavaraston kapasiteetin lisääminen kasvattamalla muotokerrointa K ja maksimirasitusta σ_m , ovat mahdollisia kehityssuuntia. Muotokertoimen arvo voidaan esimerkiksi lähes kaksinkertaistaa verrattuna perinteiseen akseloituun ratkaisuun, mikäli vauhtipyöränä voidaan käyttää akseloimatonta umpinaista levyä [29, s. 8][33, s. 239]. Akselista luopuminen kasvattaa myös vauhtipyörän kestäväksi maksimirasitusta σ_m , sillä se poistaa akselointiin liittyvän kutistesovituksen aiheuttaman lisärasituksen [29, s. 8]. Luopuminen vaatii kuitenkin erityisen ilman akselia toimivan sähkökoneen sekä laakeroinnin [62, s. 2].

Toinen itse vauhtipyörään liittyvä kehityskohde on sen valmistusmateriaali, jonka vaikutus on nähtävissä selvästi kaavasta 3. Esimerkiksi teräksestä valmistetuille vauhtipyörille odotetaan tulevaisuudessa merkittävää asemaa etenkin energiasektorilla, johtuen niiden ylivoimaisesta hinta-energia-suhteesta verrattuna komposiittivauhtipyöriin [29, s. 7–8] [63, s. 584]. Toisaalta myös täysin uusien materiaalien käyttö vauhtipyörissä on mahdollinen kehityssuunta. Uusista materiaaleista esimerkiksi grafeeni on kiinnostava vaihtoehto, sillä sen teoreettinen energiatiheys on 15 kWh/kg, joka on puolestaan merkittävästi esimerkiksi litiumakkujen energiatiheyttä korkeampi. Toinen mahdollinen kehityssuunta uusien materiaalien saralla on käyttää vauhtipyörän valmistuksessa edullista betonia. Näiden edellä esitettyjen materiaalien käyttö ei ole kuitenkaan täysin ongelmattonta, sillä esimerkiksi grafeenia hyödyntävän vauhtipyörän käytännöntoteutus ontuu sekä betonisen vauhtipyörän vetolujuus saattaa muodostua sen kehityksen esteeksi. [29, s. 8–9]

Vauhtipyöräenergiavarastojen kilpailukyvyyn parantamiseksi olisi otollista, mikäli niiden käyttöön liittyvät häviöt voitaisiin minimoida. Häviöiden pienentäminen mahdollistaisi muun muassa pidemmät varastointiajat sekä kasvattaisi tehoa ja kapasiteettia suuremman pyörimisnopeuden kautta [29, s. 3]. Esimerkiksi korkean lämpötilan suprajohtavien magneettien käyttö vauhtipyörän laakeroinnissa on kiehtova tutkimuskohde ja mahdollinen osaratkaisu näiden häviöiden pienentämisessä, johtuen niiden huomattavasti pienemmistä ominaishäviöistä verrattaessa sähkö- ja kestopagneetti laakerointeihin. Nämä ominaishäviöt liittyvät esimerkiksi pyörrevirtojen sekä hajavuon aiheuttamiin häviöihin. [64, s. 177] Suprajohteiden käytön haasteena on kuitenkin niiden vaatima kryojäähdytys sekä toteutuksen kompleksisuus [29, s. 3].

Teknisten kehityskohteiden lisäksi vauhtipyöräenergiavarastojen markkinoiden kehittäminen on tärkeä tulevaisuuden aihealue. Jotta vauhtipyöräenergiavarasto saavuttaisi kilpailukykyisen aseman suhteessa esimerkiksi akkuteknologioilla tuotettuihin ratkaisuihin, tulisi sen löytää sille ominaisin sovelluskohde sekä päästä osaksi energiasektorin vakiintuneiden toimijoiden tuotevalikoimia. [65, s. 1133] Yhtenä mahdollisena ja jo käytössä olevana sovelluskohteena on hybridikäyttö yhdessä toisen energiavaraston kanssa [50].

Järjestelmätekniikan vaatimusten mukautumista sääriippuvan tuotannon osuuden kasvuun sähköntuotannossa voidaan pitää yhtenä merkittävänä ajurina energiavarastojen käyttötarpeen kasvulle sekä täten välillisesti edellä esitetyille kehityssuunnille [66, s. 985]. On esimerkiksi mahdollista, että tulevaisuudessa yhä useammat sähköverkko-operaattorit vaativat verkkoon kytkeytyvältä tuotannolta mahdollisuutta kasvattaa tehoaan verkon taajuuden laskiessa määrätyn tason alapuolelle. Myös sääriippuvan tuotannon tehon muutosnopeuden rajoituksiin voidaan odottaa nykyistä tiukempaa sääntelyä. [66, s. 977] Toisaalta Pariisin ilmastopöytäkirjan kaltaiset sopimukset voidaan nähdä energiavarastojen kehityksen ajureina, sillä niiden tavoitteiden saavuttaminen vaatii usein sääriippuvan sähköntuotannon osuuden kasvattamista energiajärjestelmässä, mikä puolestaan lisää tarvetta energiavarastojen käytölle [3][6, s. 160].

7. YHTEENVETO

Energiavarastot tulevat näyttelemään merkittävää roolia siirtymässä kohti uusiutuvaa, sääriippuvaa sähköntuotantoa. Ne voidaan jakaa energia- ja tehotyypin varastoihin niiden käyttötarkoituksen mukaan. Energiatyypiset varastot kuten pumppuvesivoima ja paineilmaparasto sopivat hyvin pitkän aikavälin varastointiin ja täten tehotasapainon säilyttämiseen. Tehotyypin varastot kuten työssä laajemmin käsitelty vauhtipyörä, sopivat puolestaan sähkönlaadun parantamiseen kompensoimalla nopeita tehoheilahteluita.

Vauhtipyöräenergiavarasto on kiinnostava vaihtoehto etenkin hybridienergiavarastoissa sekä sääriippuvan tuotannon nopeiden tehoheilahteluiden tasaamisessa. Sen keskeisiä etuja ovat alle sekuntitason vasteaika, korkea tehotiheys, hyvä hyötysuhde sekä käyttöiän suhteellinen riippumattomuus käyttötavasta ja -olosuhteista. Vauhtipyöräenergiavarasto on potentiaalinen vaihtoehto myös taloudellisessa mielessä, sillä sen elinkaarikustannukset ovat tämän työn tulosten perusteella esimerkiksi litiumakkuenergiavarastoa edullisemmat. Elinkaarikustannuksissa ratkaisutekijäksi nousee vauhtipyöräenergiavaraston pienemmät korvauskustannukset, sillä vauhtipyörän kalliimpien komponenttien elinikä on sen elinkaaren pituuden luokkaa.

Vaikka vauhtipyörä on energiavarastoteknologioista vanhimpia, ei se ole vielä onnistunut saavuttamaan täysin vakiintunutta asemaa energiavarastomarkkinoilla ja jää usein muiden energiavarastoteknologioiden kuten akkujen varjoon. Sen haasteina on myös perinteisesti olleet suuret seisontahäviöt sekä valmistusmateriaalien korkeat hinnat. Näitä haasteita on kuitenkin onnistuttu ratkomaan, ja uudet lähestymistavat kuten akselittomat vauhtipyörät sekä uusien materiaalien käyttö parantavat teknologian menestymismahdollisuuksia.

Tässä työssä mitoitettiin vauhtipyöräenergiavarasto 4,5 MW:n DFIG-tuulivoimalan yhteyteen tasaamaan minuuttitason tehoheilahteluita. Mitoittamisen tuloksena sen kapasiteetiksi saatiin määritettyä 100 kWh ja tehoksi 1 MW. Käytännössä mitoittaminen toteutettiin vakioimalla tuulivoimalan antoteho tutkittavalla aikavälillä sellaiselle tasolle, että vauhtipyöräenergiavarasto kykeni hyötysuhteensa puitteissa säilyttämään tämän tehotason sekä oman varauksensa. Kun käytettävä antoteho oli saatu määritettyä, ratkaistiin seuraavaksi vauhtipyöräenergiavarastolta aikavälillä vaadittu teho sekä kapasiteetti. Tarkempaan arvioon näistä suureista päästiin suorittamalla edellä kuvattu analyysi koko

mitoitusaineistolle. Johtuen useista mitoittamiseen liittyvistä yksinkertaistuksista sekä tapauskohtaisesta suppeaan aineistoon perustuvasta mitoistekniikasta, voidaan saatua tulosta pitää suuntaa antavana.

Suuri osa vauhtipyöräenergiavarastoja käsittelevästä tutkimuksesta keskittyy ohjausalgoritmeihin tai ne ovat luonteeltaan teknologian nykytilaa esitteleviä kokoelma-artikkeleita. Jotta vauhtipyöräenergiavarastot voisivat saavuttaa vakiintuneen aseman energiavarastoteknologioiden joukossa, tulisi niiden käytännöntoteutukseen sekä kustannusten määrittämiseen liittyvää tutkimusta tehdä vielä nykyistä enemmän. Kustannusten määrittämiseen liittyvä tutkimus olisi myös tärkeää sen ajantasaisuuden varmistamisen kannalta.

LÄHTEET

- [1] Ympäristöministeriö, Pariisin ilmastopöytäkirja, Saatavissa (viitattu 9.2.2022): <https://ym.fi/pariisin-ilmastosopimus>
- [2] Eurooppa-neuvosto, Ilmastomuutos: mitä EU tekee?, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/>
- [3] European Environment Agency, Greenhouse gas emission intensity of electricity generation in Europe, 2021, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://www.eea.europa.eu/ims/greenhouse-gas-emission-intensity-of-1>
- [4] M. Khalid, A. V. Savkin, A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage, *Renewable Energy*, Vol.35, No.7, Jul 2010, pp. 1520–1526.
- [5] S. Sukumar, M. Marsadek, K. R. Agileswari, H. Mokhlis, Ramp-rate control smoothing methods to control output power fluctuations from solar photovoltaic (PV) sources—A review, *Journal of Energy Storage*, Vol. 20, Dec 2018, pp. 218–229.
- [6] Y. Sun, Z. Zhao, M. Yang, D. Jia, W. Pei, B. Xu, Overview of energy storage in renewable energy power fluctuation mitigation, *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol.6, No.1, Mar 2020, pp. 160–173.
- [7] A. Sumper, F. Daz-Gonzalez, O. Gomis-Bellmunt, *Energy Storage in Power Systems*, John Wiley & Sons, Incorporated, UNITED KINGDOM, 2016, 311 p. Saatavissa (viitattu: 14.2.2022): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4443208>
- [8] T. M. M Letcher, *Wind Energy Engineering: A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines*, Elsevier Science & Technology, UNITED STATES, 2017, Saatavissa (viitattu 9.2.2022): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4858115>
- [9] J. Pramod, *Wind Energy Engineering, Second Edition*, McGraw-Hill Education, New York, 2016, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071843843>
- [10] A. Nordmann, File:Wind turbine int.svg, Saatavissa (viitattu 16.2.2022): https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wind_turbine_int.svg
- [11] B. S. Guru, H. R. Hiziroglu, *Electromagnetic Field Theory Fundamentals*, Cambridge University Press, UNITED KINGDOM, 2004, 699 p. Saatavissa: (viitattu 17.2.2022): <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=266582>
- [12] N. Liaquat, *STATCOM AND SVC WITH WIND TURBINES*, Master of Science thesis, Tampere University, Faculty of Information Technology and Communication Sciences, Tampere, 2019, Saatavissa (viitattu 20.3.2022): <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201911226192>
- [13] F. Blaabjerg, M. Liserre, K. Ma, Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.48, No.2, Mar 2012, pp. 708–719.
- [14] Prokon, Hedet, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://prokonfinland.fi/fi/our-projects/bjoerkliiden-hedet>
- [15] Nordex SE, N149/4.X, Saatavissa (viitattu 18.2.2022): <https://www.nordex-online.com/en/product/n149-4-0-4-5/>
- [16] K. Kankaanpää: Neoen, J. Kjellman: Prokon, Hedet - turbine data, henkilökohtainen tiedonanto sähköpostilla 28.2.2022.
- [17] Our World in Data, Share of electricity production from wind, Saatavissa (viitattu 4.2.2022): <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-wind>
- [18] L. M. S. de Siqueira, W. Peng, Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review, *Journal of Energy Storage*, Vol.35 (102252), Mar 2021, pp. 1–11.
- [19] Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, F. D. Bianchi, Energy management of flywheel-based energy storage device for wind power smoothing, *Applied Energy*, Vol.110, Oct 2013, pp. 207–219.
- [20] K. A. Naik, C. P. Gupta, E. Fernandez, Wind power smoothing in partial load region with advanced fuzzy-logic based pitch-angle controller, *Wind Engineering*, Vol.46, No.1, Feb 2022, pp. 52–68.
- [21] Y. Zhang, Wang L, Wang N, Duan L, Zong Y, You S, et al, Balancing wind-power fluctuation via onsite storage under uncertainty: Power-to-hydrogen-to-power versus lithium battery, *Renewable & sustainable energy reviews*, Dec 2019, Vol.116 (109465), pp. 1–14.

- [22] G. Ardizzon, G. Cavazzini, G. Pavesi, A new generation of small hydro and pumpedhydro power plants: Advances and future challenges, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.31, Mar 2014, pp. 746–761.
- [23] G. Venkataramani, P. Parankusam, V. Ramalingam, J. Wang, A review on compressed air energy storage – A pathway for smart grid and polygeneration, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.62, Sep 2016, pp. 895–907.
- [24] K. C. Divya, J. Østergaard, Battery energy storage technology for power systems— An overview, *Electric Power Systems Research*, Vol.79, No.4, Apr 2009, pp. 511– 520.
- [25] L. Mancini, N. A. Eslava, M. Traverso, F. Mathieux, Assessing impacts of responsible sourcing initiatives for cobalt: Insights from a case study, *Resources Policy*, Vol.71 (102015), June 2021, pp. 1–14.
- [26] A. Ter-Gazarian, *Energy storage for power systems (2nd Edition)*, The Institution of Engineering and Technology, UNITED KINGDOM, 2011, 268 p. Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt0098DL91/energy-storage-power/title-page>
- [27] B. Tarroja, F. Mueller, J. D. Eichman, J. Brouwer, S. Samuelsen, Spatial and temporal analysis of electric wind generation intermittency and dynamics, *Renewable Energy*, Vol.36, No.12, Dec 2011, pp. 3424–3432.
- [28] S. M. Mousavi G, F. Faraji, A. Majazi, K. Al-Haddad, A comprehensive review of Flywheel Energy Storage System technology, *Renewable & sustainable energy reviews*, Vol.67, Jan 2017, pp. 477–490.
- [29] X. Li, A. Palazzolo, A review of flywheel energy storage systems: state of the art and opportunities, *Journal of Energy Storage*, Vol.46 (103576), Feb 2022, pp. 1–13.
- [30] P. Medina, A. W. Bizuayehu, J. P. S. Catalão, E. M. G. Rodrigues, J. Contreras, *Electrical Energy Storage Systems: Technologies' State-of-the-Art, Techno-economic Benefits and Applications Analysis*, 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences, Jan 2014, pp. 2295–2304.
- [31] S. Choudhury, Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Vol.31, No. 9, Sep 2021, pp.1–26.
- [32] K. R. Pullen, The Status and Future of Flywheel Energy Storage, *Joule*, Vol.3, No.6, Jun 2019, pp. 1394–1399.
- [33] B. Bolund, H. Bernhoff, M. Leijon, Flywheel energy and power storage systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.11, No.2, Feb 2007, pp. 235–258.
- [34] R. Peña-Alzola, R. Sebastián, J. Quesada, A. Colmenar, Review of flywheel based energy storage systems, 2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, May 2011, pp. 1–6.
- [35] Z. Yang, F. Shang, I. P. Brown, M. Krishnamurthy, Comparative Study of Interior Permanent Magnet, Induction, and Switched Reluctance Motor Drives for EV and HEV Applications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol.1, No.3, Oct 2015, pp. 245–254.
- [36] K. Veszpremi ja I. Schmidt, Flywheel Energy Storage Drive for Wind Turbines, 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Nov 2007, pp. 916–923.
- [37] I. Hamzaoui, F. Bouchafaa, A. Talha, Advanced control for wind energy conversion systems with flywheel storage dedicated to improving the quality of energy, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol.41, No.45, Dec 2016, pp. 20832–20846.
- [38] G. O. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, M. M. Radulescu, Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol.53, No.4, Jun 2006, pp. 1074–1085.
- [39] R. Östergård, Flywheel energy storage - a conceptual study, Master thesis, Uppsala Universitet, Uppsala, 2011, Saatavissa (viitattu 28.3.2022): <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:476114/FULLTEXT01.pdf>
- [40] C. Zhang, K. J. Tseng, A Novel Flywheel Energy Storage System With Partially-Self-Bearing Flywheel-Rotor, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.22, No.2, Jun 2007, pp. 477–487.
- [41] Beacon Power, Technology, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://beaconpower.com/technology/>
- [42] X. Wang, M. Yue, E. Muljadi, W. Gao, Probabilistic Approach for Power Capacity Specification of Wind Energy Storage Systems, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.50, No.2, Mar 2014, pp. 1215–1224.
- [43] B. Zakeri, S. Syri, Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.42, Feb 2015, pp. 569–596.

- [44] B. Zakeri, S. Syri, Corrigendum to “Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis” [Renew. Sustain. Energy Vol.42 (2015) pp. 569–596], Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.53, Jan 2016, pp. 1634–1635.
- [45] M. J. Haverila, E. Uusi-Rauva, I. Kouri, A. Miettinen, Teollisuustalous, 5. painos, Infacs Oy, Tampere, 2005, 510 s.
- [46] Stornetic, EnWheel®, Saatavissa (viitattu 6.4.2022): <https://www.stornetic.com/our-technology/enwheel>
- [47] Stornetic, DuraStor®, Saatavissa (viitattu 6.4.2022): <https://www.stornetic.com/our-technology/durastor>
- [48] Beacon Power, Beacon Power Flywheel Energy Storage Systems, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): https://beaconpower.com/wp-content/themes/beaconpower/inc/beacon_power_brochure_032514.pdf
- [49] Pillar Power Systems, Energy Storage Flywheels And Battery Systems, Saatavissa (viitattu 6.4.2022): <https://www.pillar.com/en-GB/183/energy-storage>
- [50] Hitachi Energy, Hitachi ABB Power Grids enable integration of renewables in Alaskan island microgrid, Saatavissa (viitattu 6.4.2022): <https://www.hitachienergy.com/case-studies/kodiak-island>
- [51] A. Abele, E. Elkind, J. Intrator, B. Washom, 2020 Strategic Analysis of Energy Storage Technology, California Institute for Energy and Environment (CIEE), 2011, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://escholarship.org/uc/item/5rg792nq>
- [52] X. Li, D. Hui, X. Lai, Battery Energy Storage Station (BESS)-Based Smoothing Control of Photovoltaic (PV) and Wind Power Generation Fluctuations, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol.4, No.2, Apr 2013, pp. 464–473.
- [53] O. Schmidt, S. Melchior, A. Hawkes, I. Staffell, Projecting the Future Levelized Cost of Electricity Storage Technologies, Joule, Vol.3, No.1, Jan 2019, pp. 81–100.
- [54] R. Sebastián, R. Peña Alzola, Flywheel energy storage systems: Review and simulation for an isolated wind power system, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.16, No.9, Dec 2012, pp. 6803–6813.
- [55] A. Amato, et al, Sustainability analysis of innovative technologies for the rare earth elements recovery, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.106, May 2019, pp. 41–53.
- [56] A. E. Krauklis, C. W. Karl, A. I. Gagani, J. K. Jørgensen, Composite Material Recycling Technology—State-of-the-Art and Sustainable Development for the 2020s, Journal of Composites Science, Vol.5, No.1, Jan 2021, pp. 1–33.
- [57] Y. Miao, P. Hynan, A. von Jouanne, A. Yokochi, Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements, Energies, Vol.12, No.6, Mar 2019, pp. 1–20.
- [58] Euroopan komissio, KOMMISSION TIEDONANTO EUROOPAN PARLAMENTILLE, NEUVOSTOLLE, EUROOPAN TALOUS- JA SOSIAALIKOMITEALLE JA ALUEIDEN KOMITEALLE: Kriittisiin raaka-aineisiin liittyvä häiriönsietokyky: miten lisätä toimitusvarmuutta ja kestävyttä, Saatavissa (viitattu 25.4.2022): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=EN>
- [59] European Commission, Recycled permanent magnets provide a source for rare earth elements, Saatavissa (viitattu 14.4.2022): <https://cordis.europa.eu/article/id/415387-recycled-permanent-magnets-provide-a-source-for-rare-earth-elements>
- [60] OECD, Interconnected supply chains: a comprehensive look at due diligence challenges and opportunities sourcing cobalt and copper from the Democratic Republic of the Congo, 2019, Saatavissa (viitattu 12.4.2022): <https://mneguidelines.oecd.org/Interconnected-supply-chains-a-comprehensive-look-at-due-diligence-challenges-and-opportunities-sourcing-cobalt-and-copper-from-the-DRC.pdf>
- [61] C. Wulf, P. Zapp, A. Schreiber, J. Marx, H. Schlör, Lessons Learned from a Life Cycle Sustainability Assessment of Rare Earth Permanent Magnets, Journal of Industrial Ecology, Vol.21, No.6, Dec 2017, pp. 1578–1590.
- [62] X. Li, A. Palazzolo, Multi-Input–Multi-Output Control of a Utility-Scale, Shaftless Energy Storage Flywheel With a Five-Degrees-of-Freedom Combination Magnetic Bearing, Journal of dynamic systems, measurement, and control, Vol.140, No.10, Oct 2018, pp. 1–12.
- [63] V. Kale, M. Secanell, A comparative study between optimal metal and composite rotors for flywheel energy storage systems, Energy Reports, Vol.4, Nov 2018, pp. 576–585.

- [64] S. Karrari, M. Noe, J. Geisbuesch, High-speed Flywheel Energy Storage System (FESS) for Voltage and Frequency Support in Low Voltage Distribution Networks, 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Sep 2018, pp. 176–182.
- [65] S. Wicki, E. G. Hansen, Clean energy storage technology in the making: An innovation systems perspective on flywheel energy storage, *Journal of Cleaner Production*, Vol.162, Sep 2017, pp. 1118–1134.
- [66] A. Cabrera-Tobar, E. Bullich-Massagué, M. Aragüés-Peñalba, O. Gomis-Bellmunt, Review of advanced grid requirements for the integration of large scale photovoltaic power plants in the transmission system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.62, Sep 2016, pp. 971–987.

LIITE A: MITOITUSOHJELMA

```

load Hedetdata.mat
n= 0.90; % tutkittavan energiavaraston hyötysuhde
iter_askel = 5; % Po:n iteraation askelkoko 5
dt_ind = 2*15; % mitoitus aikaväli, nyt 30*20 sekuntia eli 10 min
laskuri = 1; % laskuri tulos vektoreita varten

hedet_tutkittava = Hedet_osatehoinen; %käytettävän aineiston valinta
x=(0:20:60*60*24-20); % Alkuperäinen aikavektori, näytteenottoväli 20 s
k = 10; %toimii interpoloinnin tarkkuuskertoimena
xq=(0:(20/k):60*60*24-20); %interpoloinnin aikavektori

% Lisätään tutkittavaan dataan näytteenottopisteitä interpoloimalla:
hedet_sovite = pchip(x,hedet_tutkittava,xq);
% Alustetaan vektorit tulosten keräämistä varten:
Pvp_max_vektori = zeros(1,(length(hedet_tutkittava)/dt_ind));
Pvp_min_vektori = zeros(1,(length(hedet_tutkittava)/dt_ind));
kapasiteetti_vektori = zeros(1,(length(hedet_tutkittava)/dt_ind));
Po_vektori = zeros(1,(length(hedet_tutkittava)/dt_ind));
Pavg_vektori = zeros(1,(length(hedet_tutkittava)/dt_ind));

for i = 1:k*dt_ind:k*((length(hedet_tutkittava))-dt_ind)
    ind_iter = (i:i+dt_ind*k-1); % aikaikkunan dt indeksit
    avg = mean(hedet_sovite(ind_iter)); Po=0.95*avg; % valistunut arvaus
    Pavg_vektori(laskuri) = avg;
    x_akseli_leikkaus_laskuri = 0;

    while 1
        %Vauhtipyöräenergiavaraston teho, vertaa kaavaan (x):
        Pvp = hedet_sovite(ind_iter) - Po;

        % Tehdään 2 eri vektoria, joista toisessa (+) ja toisessa (-)
        % arvot -> mahdollistaa pinta-alojen vertailun iteroinnilla:
        ind_pos = find(Pvp <= 0); ind_neg = find(Pvp >= 0);
        Pvp_pos = Pvp; Pvp_neg = Pvp;
        Pvp_pos(ind_pos) = 0; Pvp_neg(ind_neg) = 0;

        % Lasketaan käyrien rajaamat pinta-alat:
        ala_pos = trapz(xq(ind_iter),Pvp_pos);
        ala_neg = trapz(xq(ind_iter),Pvp_neg);
        n_testi = ala_neg/ala_pos;
        pyoristetty_n_testi = abs(round(n_testi,2)); %tarkkuus muokkaus

        if pyoristetty_n_testi == n
            break
        elseif pyoristetty_n_testi < n
            Po = Po + iter_askel/200; %200
        else
            Po = Po - iter_askel;
        end
    end

    % Lasketaan välin dt x-akselin leikkauskohien määrät:

    for m = (1:1:length(Pvp)-1)
        seuraava = m+1;
        if sign(Pvp(m)) * sign(Pvp(seuraava)) == -1
            x_akseli_leikkaus_laskuri = x_akseli_leikkaus_laskuri +1;
        end
    end

    %lasketaan aikavälin maksimi teho sekä anto- että ottotehon suhteen
    Pvp_max = max(Pvp); Pvp_max_vektori(laskuri) = Pvp_max;
    Pvp_min = min(Pvp); Pvp_min_vektori(laskuri) = Pvp_min;

    % Maksimiteho*arvioitu vaikutusaika = arvio kapasiteetista
    Pvp_max_min= [Pvp_max abs(Pvp_min)];
    kapasiteetti_vektori(laskuri) = (((dt_ind*20)/x_akseli_leikkaus_laskuri)...
        *max(Pvp_max_min))/3600);

    Po_vektori(laskuri) = Po;
    laskuri = laskuri + 1; %indeksointi laskuri
end

```