



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Aki Koski

Tuulivoimalan generaattorin linjauksen tarpeen määrittäminen

Opinnäytetyö

Kevät 2025

Insinööri (AMK), Konetekniikka



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (AMK), Konetekniikka

Suuntautumisvaihtoehto: Kone- ja tuotantotekniikka

Tekijä: Aki Koski

Työn nimi: Tuulivoimalan generaattorin linjauksen tarpeen määrittäminen

Ohjaaja: Heikki Kokkonen

Vuosi: 2025

Sivumäärä: 44

Liitteiden lukumäärä: 1

Tämä opinnäytetyö on toteutettu Vestas Finland Oy:lle. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli analysoida tuulivoimalan generaattorin linjaamisen tarvetta vaihdelaatikon puslien tarkastuksen yhteydessä. Työn taustalla on tekijän henkilökohtainen kiinnostus tuulivoimaloiden huoltoon sekä keskustelut kollegoiden kanssa.

Tutkimusmenetelmänä käytettiin kvantitatiivista tutkimusta, jossa analysoidaan tutkittavaan aiheeseen liittyviä yrityksen tarkastusraportteja. Tutkimuksessa tarkastellaan generaattorin linjausvirheitä ja niiden korjaustarvetta. Tulokset osoittivat, että kunnonvalvontajärjestelmän hälytykset heijastavat todellista tarvetta linjausten korjaamiselle. Opinnäytetyö tarjoaa myös tietoa tuulivoimalan rakenteesta ja kunnossapidosta.

Tutkimukseen kuuluva liite 1 sisältää luottamuksellista aineistoa, eikä se ole saatavilla opinnäytetyön julkisessa versiossa.

¹ Asiasanat: tuulivoimalat, huolto, generaattorit, kunnonvalvonta

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree program: Bachelor of Engineering, Mechanical Engineering

Specialisation: Mechanical and Production Engineering

Author: Aki Koski

Title of thesis: Alignment of wind turbine generators

Supervisor: Heikki Kokkonen

Year: 2025

Number of pages: 44

Number of appendices: 1

The thesis was conducted for Vestas Finland Oy. The objective was to analyse the necessity of generator alignment in wind turbines during gearbox bushing inspections. The idea for this rose from the author's personal interest in wind turbine maintenance and it was developed further in discussions with colleagues.

The study applied a quantitative research method, analysing the relevant inspection reports of the company. The study examined generator misalignments and the need for their correction. The findings indicated that alarms from the condition monitoring system effectively reflect the actual need for alignment adjustments. The thesis also provided insights into the structure and maintenance of wind turbines. Appendix 1 contains confidential information and therefore not included in the public version of this thesis.

¹ Keywords: wind turbines, maintenance, generators, condition monitoring,

SISÄLTÖ

| | |
|--|----|
| Opinnäytetyön tiivistelmä | 2 |
| Thesis abstract | 3 |
| SISÄLTÖ | 4 |
| Kuva- ja kuvioluettelo..... | 6 |
| Käytetyt termit ja lyhenteet..... | 7 |
| 1 JOHDANTO | 8 |
| 1.1 Työn tausta | 8 |
| 1.2 Työn tavoitteet..... | 8 |
| 1.3 Yritysesittely | 9 |
| 2 TUULIVOIMALA | 10 |
| 2.1 Mikä on tuulivoimala? | 10 |
| 2.2 Tuulivoimalan osat | 11 |
| 2.2.1 Roottori ja lavat..... | 12 |
| 2.2.2 Tornit..... | 13 |
| 2.2.3 Konehuone eli naselli..... | 14 |
| 2.2.4 Kääntöjärjestelmä | 15 |
| 2.2.5 Generaattori | 16 |
| 2.2.6 Vaihdelaatikko..... | 17 |
| 2.3 Tuulivoimalan kunnossapito | 19 |
| 2.3.1 Kunnossapitoon liittyvät määritelmät..... | 20 |
| 2.3.2 Tuulivoimalassa tehtävä määräaikaishuolto..... | 20 |
| 2.3.3 Kunnonvalvontajärjestelmä | 21 |
| 3 TUULIVOIMALAN GENERAATTORIN LINJAUKSEN TARPEEN MÄÄRITTÄMINEN..... | 23 |
| 3.1 Linjauksen tarkastelu työnä ja resursseina..... | 24 |
| 3.1.1 Nykyprosessin kuvaus | 24 |
| 3.1.2 Vaihdelaatikon puslien tarkastus..... | 24 |
| 3.1.3 Generaattorin linjaus..... | 26 |

| | | |
|-----|-------------------------------------|----|
| 3.2 | Linjauksen tarpeen tarkastelu | 28 |
| 4 | MENETELMÄT | 30 |
| 4.1 | Tutkimusmenetelmän esittely | 30 |
| 4.2 | Pohja-aineiston tutkiminen | 30 |
| 5 | TULOKSET | 33 |
| 5.1 | Keskeiset tutkimustulokset | 33 |
| 5.2 | Tutkimustulosten arviointi | 36 |
| 6 | YHTEENVETO JA OMAT POHDINNAT | 38 |
| 6.1 | Yhteenveto | 38 |
| 6.2 | Kehittämisehdotukset | 38 |
| 6.3 | Ammatillinen kehittyminen | 39 |
| | LÄHTEET | 41 |
| | LIITTEET | 44 |

Kuva- ja kuvioluettelo

| | |
|---|----|
| Kuva 1. Tuulivoimalan pääkomponentit | 11 |
| Kuva 2. Putkimaisen terästornin pystytys. | 13 |
| Kuva 3. Esimerkki nasellin komponenteista Vestaksen 2 MW GridStreamer™-voimalassa | 14 |
| Kuva 4. Esimerkki kääntöjärjestelmästä | 15 |
| Kuva 5. Kaksoissyötetyn induktiogeneraattorin (DFIG) periaatekuva | 17 |
| Kuva 6. Tuulivoimalan vaihteiston voimansiirtorakenne | 19 |
| Kuva 7. Linjausvirheet..... | 23 |
| Kuva 8. Puslien sijainti vaihdelaatikossa..... | 25 |
| Kuva 9. Hydraulikkaletku, paineyksikkö ja hydraulikkaväännin. | 28 |
| | |
| Kuvio 1. Linjausvirheiden jakautuminen kunnonvalvontajärjestelmän eri hälytystasoilla. | 33 |
| Kuvio 2. Generaattorin linjausvirhe pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa..... | 34 |
| Kuvio 3. Generaattorin linjausvirhe sivuttaissuuntaisessa poikittaissuunnassa. | 35 |

Käytetyt termit ja lyhenteet

| | |
|-------------|--|
| A/S | Lyhenne vastaa suomalaista Oy (osakeyhtiö)-tunnusta. Tanskaksi Aktieselskab |
| CMS | Condition Monitoring System eli kunnonvalvontajärjestelmä |
| IEC | International Electrotechnical Commission on kansainvälinen sähköalan standardointijärjestö. |
| LOTO | Lock out/Tag out on turvallisuusmenettely, jolla estetään koneiden odottamaton käynnistyminen tai vaarallisen energian vapautuminen huolto- ja korjaustöiden aikana. |

1 JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Tämä opinnäytetyö on toteutettu Vestas Finland Oy:lle. Työn aihe kumpuaa opinnäytetyön tekijän henkilökohtaisesta kiinnostuksesta tuulivoimaloiden huoltoon sekä pohdinnasta yksittäisen työtehtävän suorittamisesta tällä hetkellä suunnitellulla tahdilla. Tekijän henkilökohtaisen pohdinnan lisäksi aihe on herättänyt keskustelua myös muiden saman aiheen parissa työskentelevien kollegoiden keskuudessa. Aiheen kollektiivinen tarkastelu johti syvällisempään analyysiin työtehtävän todellisesta tarpeesta ja sen perusteluista. Tarkastelun myötä muotoutunut kysymys herätti innostavaa kiinnostusta myös muualla organisaatiossa. Tämän prosessin myötä kävi ilmeiseksi, että aihe ansaitsisi perusteellisemman tutkimuksen, mikä lopulta johti tämän opinnäytetyön syntymiseen.

1.2 Työn tavoitteet

Opinnäytetyön tavoitteena on analysoida lähtökohtia ja toimenpiteitä, jotka koskevat tuulivoimalan generaattorin linjaamisen tarvetta, kun tarkastetaan tuulivoimalan vaihdelaatikon vääntövarsien puslien kulumista. Säännölliset huolto-ohjelman ulkopuoliset tarkastukset ovat ajankohtaisia esimerkiksi silloin, kun tuulivoimalan automaattinen kunnonvalvontajärjestelmä alkaa antamaan poikkeavia värähtelyarvoja.

Opinnäytetyön tavoitteena on antaa yritykselle yksityiskohtainen analyysi työtehtävästä ja siihen vaikuttavista tekijöistä, jolloin opinnäytetyötä voidaan konkreettisesti hyödyntää esimerkiksi resurssien suunnittelussa. Työ tuottaa informaatiota, jota voidaan hyödyntää myös työntekijöiden osaamisen kehittämisessä. Tekniikasta kiinnostuneelle lukijalle työ esittelee mielenkiintoisesti tuulivoima-alaa, josta on yllättävän vähän tietoa suomeksi, vaikka ala käsittää jo 24 % Suomen sähkön tuotannosta.

Opinnäytetyön tavoitteena on myös esitellä tuulivoimalan rakennetta keskittyen tarkemmin vaihdelaatikkoon ja voimalan generaattoriin. Tuulivoimala on kokonaisuus, joka käsittää myös perustukset, mutta sen käsittely on rajattu pois tästä työstä. Työ keskittyy käsittelemään aihetta teollisen kokoluokan voimaloiden näkökulmasta. Teollisen kokoluokan

voimalasta puhuttaessa tarkoitetaan voimaloita, joiden nimellisteho liikkuu MW-luokassa. Opinnäytetyöstä on rajattu pois myös suoravetotekniikalla (direct drive) toimivat voimalatyypit.

1.3 Yritysesittely

Vestas Finland Oy toimii osana kansainvälistä suuryritystä Vestas Wind Systems A/S:ää. Vestas Wind Systems A/S on tanskalainen suuryritys, joka valmistaa, asentaa ja huoltaa tuulivoimaloita. Yritys on noteerattu Kööpenhaminan pörssissä ja sen liikevaihto oli vuonna 2024 17.3 miljardia euroa (Vestas Wind Systems (Vestas), 2025, s. 7). Yrityksen nykyiseen maatuulivoimaloiden (onshore) tuotevalikoimaan kuuluvat 2 megawatin ja 4 megawatin tuotesarjat sekä EnVentus™-tuotesarja. EnVentus™ on Vestaksen tuotenimi 6–7 megawatin teholuokan tuulivoimaloille (Vestas, i.a.-a). Yrityksen lippulaivamalli on tällä hetkellä merituulivoimala (offshore) mallinimellä V236, ja sen nimellisteho on 15 MW (Vestas, i.a.-b).

Vestas Finland Oy on perustettu vuonna 2011 ja sen keskeisenä tehtävänä on tuottaa huolto- ja ylläpitopalveluita Vestas Wind Systems A/S:n toimittamien tuulivoimaloiden asiakkaille, takuun ja eriasteisten huoltosopimusten puitteissa. Vestas Finland Oy:n yritysrekisteriin ilmoitettu osoite sijaitsee Vaasassa, jonne on keskitetty yrityksen pääkonttori. Pääkonttori toimii yrityksen keskuksena, josta käsin koordinoidaan koko Suomen laajuista huoltoverkostoa. Yrityksellä on 17 huoltotoimipistettä, joista eteläisin sijaitsee Tampereella ja pohjoisin Posiolla. Kattava huoltoverkosto on todella tärkeä, sillä Vestas Wind Systems A/S:än valmistamien tuulivoimaloiden kumulatiivinen osuus Suomen tuulivoimakapasiteetista megawatteina on 54 % (Suomen uusiutuvat, 2025, s.11). Yrityksen 12/2023 päättyneen tilikauden mukaan Vestas Finland Oy:ssä oli 225 työntekijää (Suomen Asiakastieto, 2024).

2 TUULIVOIMALA

2.1 Mikä on tuulivoimala?

Tuulivoimala, josta voidaan käyttää myös nimitystä tuuliturbiini, on tuotantolaitos, jossa tuulen liike-energiaa muunnetaan turbiinin akselia pyörittäväksi mekaaniseksi energiaksi. Akseli pyörittää generaattoria, joka tuottaa sähköä. Tuulivoimalan napa (hub) ja lavat muodostavat roottorin. Tuulivoimalassa roottorin jatkona on konehuone, jota alalla vakiintuneen sanaston mukaan kutsutaan naselliksi. Konehuoneessa sijaitsee voimalan muut sähköntuotantoon liittyvät komponentit ja koneistot. Teollisen kokoluokan tuulivoimalat ovat yleensä vaaka-akselisia ja kolmelapaisia. Tuulen voimala ottaa vastaan etupuolelta. Tämä voimalatyypin on yleisin teollisessa energiantuotannossa. Tällä voimalatyypillä on erinomainen hyötysuhde, kun verrataan muun tyyppisiin tuulivoimaloihin. Muun tyyppisiä tuulivoimaloita ovat esimerkiksi Savonius-roottori sekä Darrieus-roottori, jotka molemmat ovat pystyakselisia (Kauppinen, 2018, s. 250). Mainitseminen arvoinen vaaka-akselinen takatuulivoimala on 1978 valmistunut maailman ensimmäinen MW-luokan tuulivoimala Tvindkraft (Tvindkraft, i.a.). Se sijaitsee Tanskan Ulfborgissa ja tuottaa sähköä vielä tänäkin päivänä.

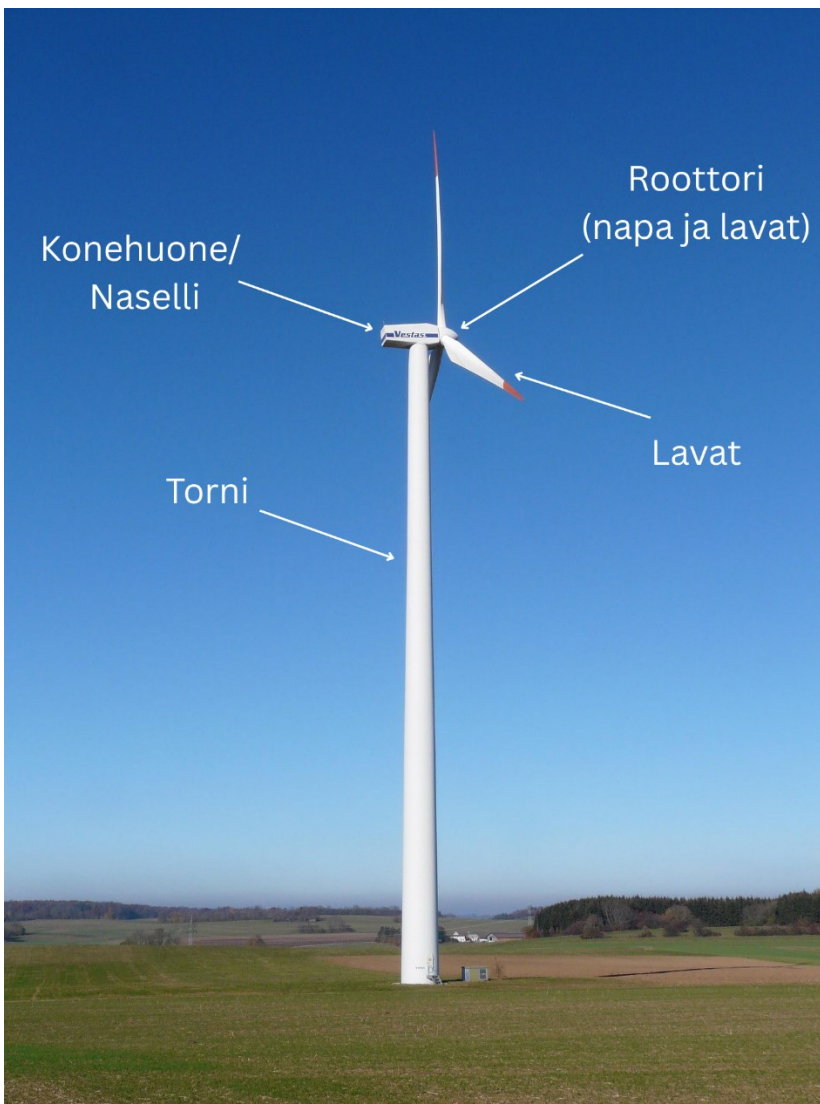
Tuulivoimalan käynnistymistuulennopeus eli se tuulennopeus, jonka jälkeen voimalan lavat kääntyvät hakemaan tuotantokulmaa ja generaattori alkaa tuottamaan sähköä, on noin 3 m/s (Kauppinen, 2018, s. 247–253). Myrskyraja on tuulennopeus, jolloin tuulivoimala pysähtyy. Yleinen tuulenvoimakkuuden raja tälle on 25 m/s. Tämä johtuu siitä, että ei ole taloudellisesti kannattavaa mitoittaa voimaloita kestämään erittäin kovia tuulia, joita käytännössä esiintyy vain harvakseltaan. Napakorkeudella kuvataan tuulivoimalan korkeutta maanpinnasta roottorin keskipisteeseen. Tuulivoimaloiden kokoa kuvaillaan niiden nimellisteholla, napakorkeudella tai roottorin halkaisijalla. Yleensä puhutaan nimellistehosta, joka on voimalan suurin tuottama teho. Tuulivoimaloiden tuotanto nousee napakorkeuden kasvaessa, sillä tuulennopeus on suurempi mitä korkeammalla ollaan.

Tuulivoimaloita määrittelee standardisarja IEC 61400. Tässä standardisarjassa esitellään suunnitteluvaatimukset tuulivoimaloille (Sirviö, 2022). Esimerkiksi standardisarjan

ensimmäisessä osassa määritellään, kuinka suunniteltavan voimalan asennuspaikassa tulee ottaa huomioon vallitsevat ilmastolliset olosuhteet.

2.2 Tuulivoimalan osat

Teollisen kokoluokan tuulivoimala koostuu useista komponenteista, joista iso osa on tuttuja myös muista turbiinitekniikalla toimivista energiantuotantolaitoksista. Yksinomaan tuulivoimalalle (kuva 1) ominaisia järjestelmiä ovat lavoista ja navasta koostuva roottori, jota ohjataan lapakulmansäädöllä (pitch system) sekä kääntöjärjestelmällä (yaw system), joka ohjaa tuulivoimalaa tuulensuuntaan perustuen tuulianturin tuottamaan dataan. Tässä luvussa tarkastellaan tuulivoimalan osia ja niiden toimintaa.



Kuva 1. Tuulivoimalan pääkomponentit (perustuu Hans, 2011)

2.2.1 Roottori ja lavat

Tuulivoimalan roottori ja lavat ovat näkyvimmit komponentit voimalasta (kuva 1). Niiden tehtävä on ottaa tuulen kineettinen energia talteen ja muuttaa se pyörimisenergiaksi (BGB, i.a). Roottorin lavat suunnitellaan siten, että ne maksimoivat talteen otettavan energian samalla minimoiden ilmanvastusta ja turbulenssia. Yleisimmät lapojen valmistusmateriaalit ovat lasikuitu, hiilikuitu ja puu. Näitä materiaaleja käyttämällä päästään optimaaliseen yhdistelmään lujuutta, jäykkyyttä sekä keveyttä. Lajojen tehtävä on toimia myös voimalan tehonsäätö- ja pysäytysmekanismina (Kauppinen, 2018, s. 254).

Lapakulmansäätö (pitch system) on järjestelmä, jolla säädetään lavan kantovoimaa. Tuulivoimalan tehoa voidaan optimoida tai rajoittaa kääntämällä lapakulma vastaamaan tuulen nopeutta (Kauppinen, 2018, s. 255). Lapakulmasäädetyssä voimalassa lapa on kohtisuorassa tuuleen nähden, kun voimala on pysähdyksissä. Käynnistyessä tuulivoimalan lavat lähtevät kääntymään kohti tuulen suuntaa. Lapakulmansäätöjärjestelmä säättää aktiivisesti lapoja tällä välillä niin, että kulma on optimaalinen tuulennopeuteen nähden. Mikäli tuuli on sen verran voimakasta, että voimala saavuttaa nimellistehonsa, säättää järjestelmä lapakulmaa takaisin positiiviseen suuntaan. Häätäpysäytyksessä järjestelmä ajaa lavat nopeasti takaisin suoraan kulmaan. Opinnäytetyön tekijän kokemukseen perustuen eri valmistajilla on erilaisia tapoja toteuttaa lapakulmansäätöjärjestelmä. Vastään tulleissa järjestelmissä lapojen säätämiseen käytetään joko sähkömoottoreita tai hydrauliiikkaa. Järjestelmissä, joissa lapakulmansäätö toteutetaan sähkömoottoreilla, lapojen ajaminen hätätapauksessa takaisin suoraan kulmaan esimerkiksi sähköverkon katoamisen vuoksi, suoritetaan navassa olevan akuston avulla. Hydraulisessa toteutuksessa lapoja ohjataan hydrauliiikkasyylintereillä ja hätäpysäytys palauttaa lavat paineakkujen avulla.

Tuulivoimalan roottorin keskeinen osa on napa (hub) (Demurtas, 2021). Napa on osa, joka yhdistää lavat pääakseliin. Navan päätehtävä on siirtää lavoista syntyvä vääntömomentti pääakseliin. Tämän takia napaan kohdistuu suuria mekaanisia voimia. Tuulivoimalan napa valmistetaan pääasiassa teräksestä hitsaamalla tai valamalla muottiin. Rakenteellisesti valittu napa on yleisesti ottaen parempi, sillä se on yhtenäinen kappale ja valamalla pystytään paremmin toteuttamaan vaikeita muotoja. Teollisen kokoluokan tuulivoimaloissa käytetään pääasiassa valurautaisia nappoja, joissa on koneistettu laippaliitos pääakselille.

2.2.2 Tornit

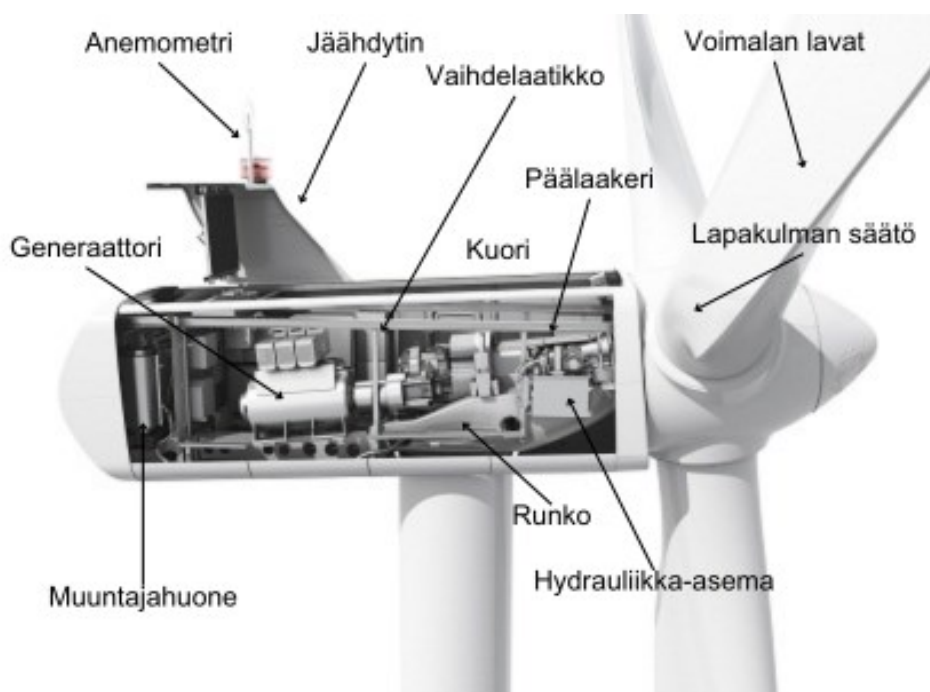
Tuulivoimalan torni on rakenne, joka kannattelee roottoria ja konehuonetta (nacelle) (Stavridou ym., 2020). Tornin tarkoitus on mahdollistaa turbiinin sijoittaminen korkealle, missä tuulen nopeus on suurempi ja tuuli on vakaampaa. Putkimainen terästorni (tubular tower) on yleisin käytetty tornityyppi. Putkimainen terästorni valmistetaan tehtaalla taivuttamalla teräslevyjä putkimaisiksi renkaiksi, jotka hitsataan peräkkäin, muodostaen näin tornin osan. Sekä logistisista että teknisistä syistä tornin osat ovat yleensä 20–30 metrin pituisia. Osat yhdistetään kohteessa toisiinsa pulttiliitoksilla. Putkimaisen terästornin etuna on vahva rakenne, isojen osien esivalmistus ja vähäinen työvoiman tarve voimalan pystytysvaiheessa. Toinen teräksestä valmistettu tornityyppi on ristikkotorni, jonka etuna on sen kyky kantaa suuria kuormia kevyellä rakenteella.



Kuva 2. Putkimaisen terästornin pystytys (Linde, 2017).

2.2.3 Konehuone eli naselli

Tuulivoimalan konehuone eli naselli on suuri rakenne, joka sijaitsee tornin päässä (Maersk Training, i.a.). Naselli sisältää voimalan kannalta keskeisiä komponentteja. Nasellin kuori (kuva 3) on yleensä valmistettu lasikuidusta teräsrungon ympärille, ja sen aerodynaamisella muodolla on pyritty minimoimaan tuulen vastusta. Teollisen kokoluokan tuulivoimaloissa naselli voi kooltaan olla pienen asunnon kokoinen.



Kuva 3. Esimerkki nasellin komponenteista Vestaksen 2 MW GridStreamer™-voimalassa (perustuu Garrett & Rønde, 2012)

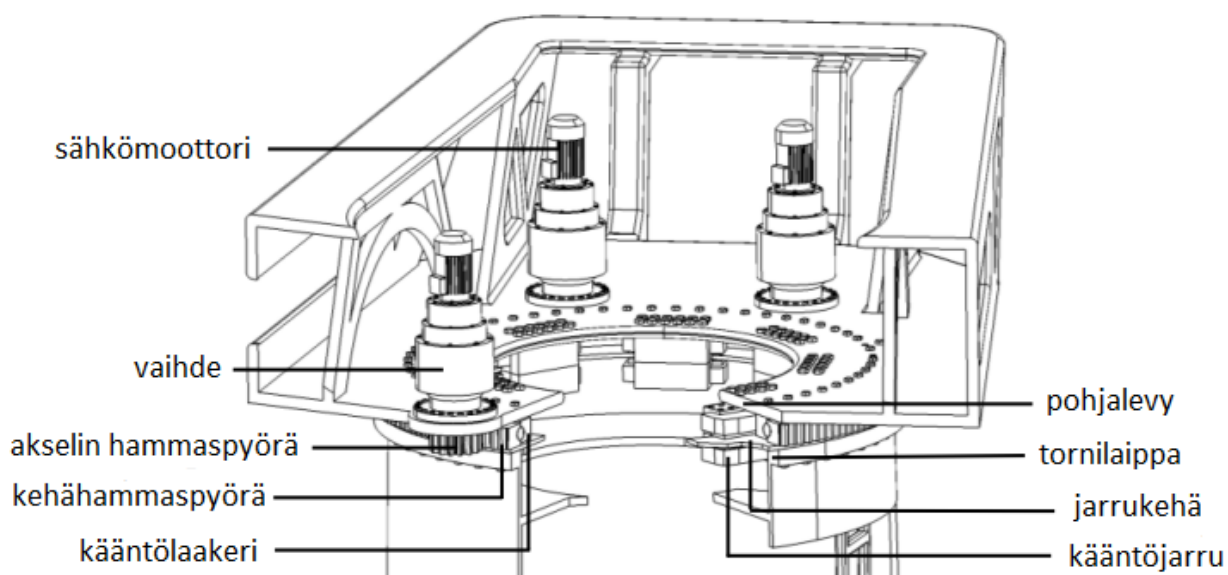
Roottori on kiinni pääakselissa (main shaft), jonka toinen pää on kiinni vaihdelaatikossa (Garrett & Rønde, 2012). Pääakselia tukee päälaakeri (kuva 3). Vaihdelaatikon perässä on generaattori, joka on kytketty vaihdelaatikkoon lasikuituisella kytkimellä (coupling). Generaattorin (kuva 3) tuottama sähkö johdetaan taajuusmuuttajalle, josta se kulkee kuvan 3 esimerkin mukaan nasellin perälle muuntajahuoneeseen. Opinnäytetyön tekijä on nähnyt myös muiden voimalavalmistajien ratkaisuja, joissa muuntaja on sijoitettu tuulivoimalan kellariin tai pihalle.

Vaihdelaatikko ja generaattori tarvitsevat voimakkaan lämmöntuoton myötä myös jäähdytysjärjestelmän, tässä esimerkki voimalamallissa järjestelmän jäähdytin (kuva 3) on

sijoitettu katolle (Garrett & Rønde, 2012). Nasellissa sijaitsee myös erilaisia tuulivoimalan ohjausjärjestelmiä, kuten esimerkiksi katolle sijoitettu anemometri (Kuva 3). Anemometri tuottaa tietoa tuulen nopeudesta sekä tuulensuunnasta, joiden perusteella voimalan suuntaa ja tehontuottoa säädellään. Voimalan mekaaninen jarru sijaitsee vaihdelaatikon takana. Esimerkkivoimalassa on myös hydraulikka-asema, jolla tuotetaan painetta lapakulmansäätöjärjestelmälle sekä mekaaniselle jarrulle.

2.2.4 Kääntöjärjestelmä

Tuulivoimalan kääntöjärjestelmä on olennainen järjestelmä voimalan toiminnalle (Kim & Dalhoff, 2014). Järjestelmän päätehtävänä on kääntää nasellia tornin ympäri siten, että roottori on kohtisuorassa tuulen suuntaan nähden ja näin tuottaen parhaan saatavilla olevan tehon tuulesta. Tarvittaessa, tuulen nopeuden kasvaessa liian suureksi, kääntöjärjestelmä kääntää nasellin poispäin tuulesta. Kääntöjärjestelmää kutsutaan pääasiassa englanninkielisen nimityksen (yaw) mukaan, jolloin vältetään sekaantumisen lapakulmansäätöjärjestelmään (pitch system).



Kuva 4. Esimerkki kääntöjärjestelmästä. (perustuu Kim & Dalhoff, 2014).

Tyypillinen kääntöjärjestelmä koostuu useista kääntömoottoreista (Kim & Dalhoff, 2014). Kääntömoottoreina käytetään sähkömoottoreita, joissa on alennusvaihteisto ja hammaspyörä (kuva 4). Taajuusmuuttajilla voidaan säätää kääntämisnopeutta. Kääntöjärjestelmän

jarru on toteutettu erillisellä jarrutusjärjestelmällä. Jarrutusjärjestelmä on toteutettu tornilaidan alapuolelle sijoitetulla jarrukehällä, jota pitkin liukuvat erilliset kääntöjarrut. Erillisten kääntöjarrujen ongelmana on ollut joskus esiintyvät ääniongelmat.

2.2.5 Generaattori

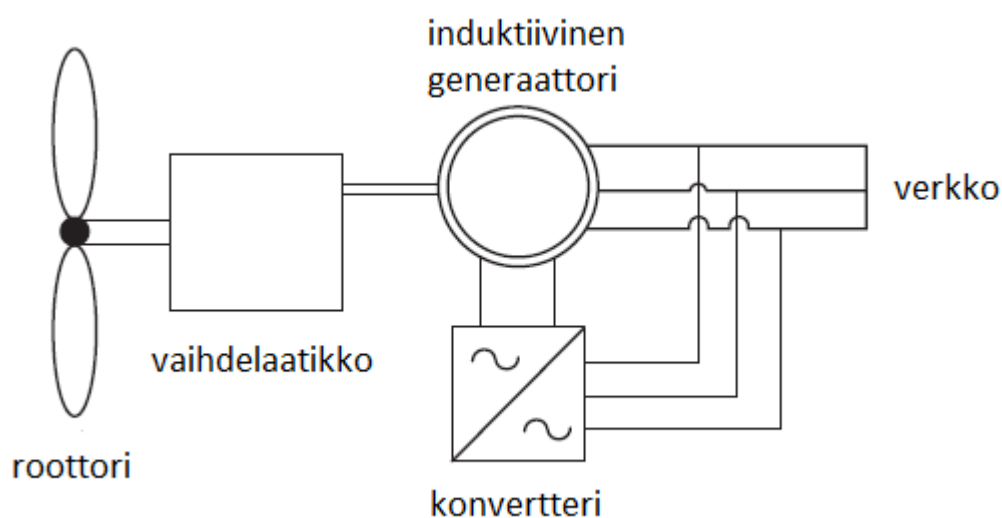
Generaattori (kuva 3) on laite, jonka tehtävä on muuntaa mekaaninen energia sähkömagneettisella induktiolla sähköenergiaksi (Korpela, 2016, s. 70). Tuulivoimalassa generaattorin mekaaninen energia saadaan pyörivästä roottorista. Tuulivoimaloissa generaattorit ovat pääsääntöisesti vaihtosähkögeneraattoreita. Tuulivoimaloissa voidaan käyttää sekä tahti-että epätahtigeneraattoreita.

Tahtigeneraattori on vaihtosähkökone, jossa roottori pyörii samassa tahdissa staattorin magneettikentän kanssa (Korpela, 2016, s. 73–74). Siinä on staattori ja roottori, jossa on magnetointikäänitys. Tahtigeneraattorin jännitettä ja loistehoa säädetään muuttamalla roottorin magnetointivirtaa erillisen magnetointijärjestelmän avulla. Erillinen magnetointijärjestelmä voidaan korvata myös kestopagneeteilla, mutta tämä todennäköisesti nostaa generaattorin hintaa.

Epätahtigeneraattori on vaihtosähkökone, jossa roottori pyörii epätahdissa staattorin aiheuttaman pyörivän magneettikentän kanssa (Korpela, 2016, s. 75). Epätahtigeneraattori perustuu siihen, että roottori pyörii nopeammin kuin staattorin magneettikenttä. Epätahtigeneraattoria kutsutaan myös oikosulkugeneraattoriksi. Oikosululla viitataan oikosuljettuihin roottorin käämeihin. Epätahtigeneraattori muuttaa mekaanisen energian sähköenergiaksi niin, että roottorin pyörimisnopeus on hieman tahtinopeutta isompi. Tästä epätahdistä käytetään sanaa ”jättämä”.

Tuulivoimassa on käytössä erilaisilla tekniikoilla toimivia generaattorityyppejä, mutta tällä hetkellä maalle rakennettavien (on-shore) tuulivoimaloiden markkinoita hallitsevin generaattorityyppi on kaksoissyöttöinen epätahtigeneraattori, DFIG (Double-Fed Induction generator) (European Commission, 2020). Kaksoissyöttöinen induktiogeneraattori on kehittyneempi ja joustavampi vaihtoehto verrattaessa perinteiseen oikosulkuinduktiogeneraattoriin (Breeze, 2016). Perinteisessä induktiogeneraattorissa staattori on kytketty suoraan

sähköverkkoon ja roottori on suljettu johdinsilmukka. Kaksoissyötetyssä induktiogeneraattorin roottorissa on sen sijaan kolmivaihekäämitykset, jotka on kytketty myös verkkoon tehoelektronisten DC/AC-muuntimien kautta (kuva 5). Nämä muuntimet mahdollistavat magneettikentän syntyminen roottorin käämityksiin, minkä ansiosta saadaan roottorin pyörimiseen tarvittava vääntömomentti. Tämän vääntömomentin suuruus riippuu magneettikenttien voimakkuudesta ja niiden välisestä vaihekulmasta. Magneettikenttiä säätämällä tuulivoimala voi toimia laajalla pyörimisnopeusalueella, noin 30 % verkon taajuudesta.



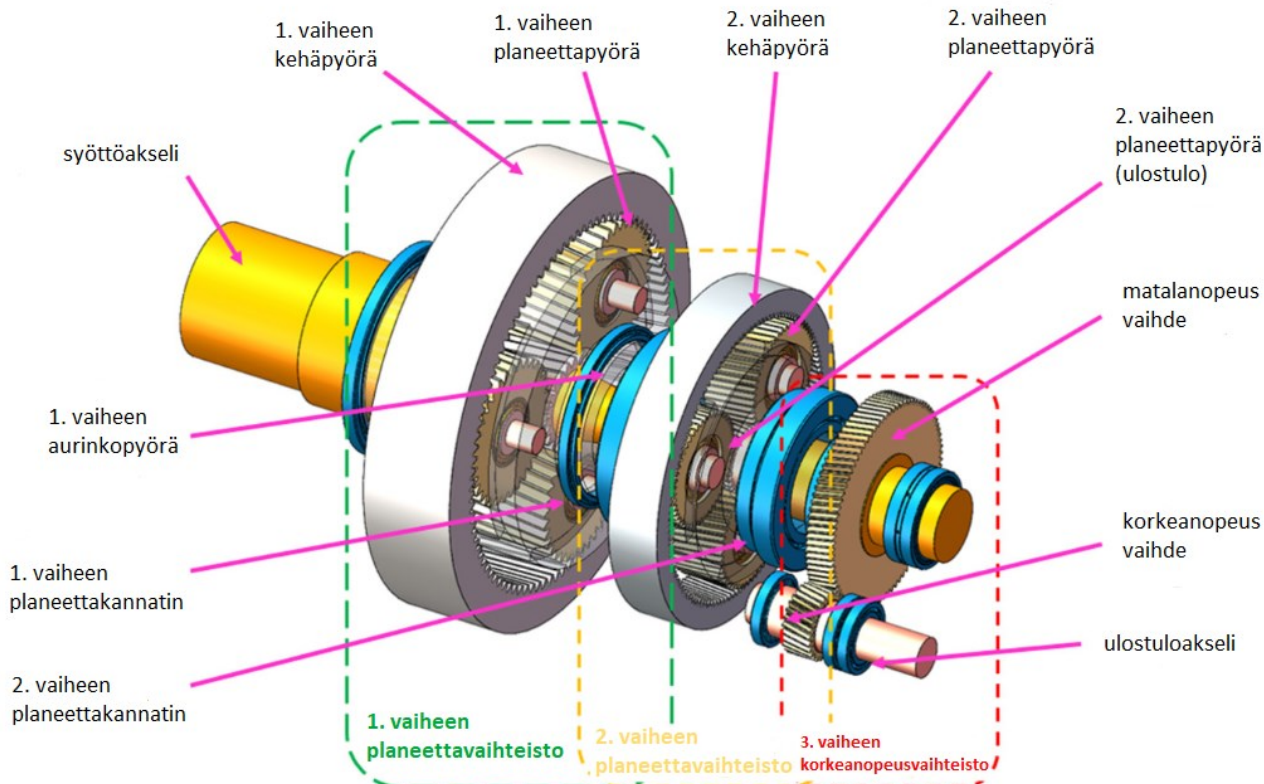
Kuva 5. Kaksoissyötetyn induktiogeneraattorin (DFIG) periaatekuva (perustuu Breeze, 2016)

2.2.6 Vaihdelaatikko

Tuulivoimalassa vaihteiston (kuva 6) tehtävänä on nostaa roottorin pyörimisnopeus generaattorin vaatimalle tasolle (Breeze, 2016). Perinteiset voimaloissa käytettävät generaattorit pyörivät jopa 1500 kierrosta minuutissa (rpm) tuottaen sähköä 50 Hz sähköverkkoon synkronoidusti. Pienet tuulivoimalat voivat pyöriä nopeuksilla, jotka sopivat näille perinteisille generaattoreille, jolloin roottorin tuottama energia saadaan suoraan generaattoriin. Kuitenkin teollisen kokoluokan voimalat pyörivät niin hitaasti, että niiden yhteydessä ei voi käyttää perinteistä generaattoria. Yleinen ratkaisu on siksi ollut sijoittaa voimansiirtoon vaihteisto, joka nostaa pyörimisnopeutta tyypillisesti noin 100-kertaiseksi. Tarkka suhde riippuu voimalan suunnittelusta.

Tuulivoimalan vaihteiston suunnittelun päähaasteena on, että voimalan vaihteistojen on kestävä iskuja ja kuormituksia, joita ei esiinny muissa turbiinivoimaloissa (Breeze, 2016). Akselin taivutusvoimien lisäksi esiintyy myös äkillisiä vääntömomentin muutoksia. Näitä äkillisiä vääntömomentin muutoksia aiheuttavat esimerkiksi voimakkaat tuulen puuskat. Siksi voimansiirron suunnittelussa vaihdelaatikko suojataan kestäämään näitä iskuja tai vaihdelaatikko on rakennettava kestäämään niitä. Yksi ratkaisu kuormituksen ja kulumisen vähentämiseksi on erottaa tuulivoimalan roottorin ja pääakselin tuenta voimalan vääntömomentin siirrosta. Tämä auttaa suojaamaan vaihteistoa joistakin roottorin kokemista voimista. Voimansiirron uudelleenkohdistus, toisin sanoen linjaaminen, auttaa myös minimoimaan jännitystä ja kulumista vaihteistossa.

Kuvassa 6 näkyy tuulivoimaloissa yleisesti käytetyn vaihdelaatikon voimansiirtojärjestelmä (Cui ym., 2024). Syöttöakseli syöttää roottorilta tulevan tehon syöttöakseliin, joka välittää sen ensimmäiselle planeetakannattimelle. Planeetakannatin pyörittää ensimmäistä planeettapyörää, ja ensimmäisen planeettapyörän hammastus kytkeytyy ensimmäiseen aurinkopyörään ja ensimmäisen vaiheen kehäpyörään. Tämä liike välittyy seuraavaan vaiheeseen ulostuloakseliin integroidun kiilan kautta, joka on myös integroitu aurinkopyörään. Toinen vaihe noudattaa samaa kokoonpanoa. Kolmannen vaiheen hitaan akselin ja toisen vaiheen ulostuloakselin välillä on kiilaliitos, joka vastaanottaa vääntömomentin. Kiihdytys saavutetaan vinohampaisen hammaspyöräparin avulla, mikä johtaa lopulta ulostuloakselin kautta tapahtuvaan ulostuloon, siitä jatkaen generaattorille.



Kuva 6. Tuulivoimalan vaihteiston voimansiirtorakenne (perustuu Cui ym., 2024).

Eri valmistajat käyttävät erilaisia ratkaisuja tuulivoimaloiden voimansiirrossa ja monet suosivat edelleen jonkinlaista vaihteistoa. Tuulivoimaloiden vaihteistojen pääongelma-alueet on tunnistettu, mutta näiden ongelmien poistaminen on edelleen hankalaa (Breeze, 2016). Isoimmat valmistajat ovat kehittäneet kunnonvalvontajärjestelmiä (CMS), joiden tarkoitus on tunnistaa vaihdelaatikon mahdollisia ongelmia hyvissä ajoin (Feng ym., 2012). Näin pyritään välttämään turhia voimaloiden seisokkeja vaihdelaatikon rikkoutumisen vuoksi. Kunnonvalvontajärjestelmät mittaavat vaihdelaatikon aiheuttamia värinöitä, öljynpainetta sekä laakereiden lämpötiloja. Öljystä mitataan myös metallipartikkeleiden määrää. Vaihdelaatikon voitelu on ensiarvoisen tärkeää vaihdelaatikon toiminnalle.

2.3 Tuulivoimalan kunnossapito

Tuulivoimaloita täytyy huoltaa niin kuin mitä tahansa tuotantolaitosta tai konetta (Palmu, 2016). Tuulivoimalassa on merkittäviä eroja muihin tuotantolaitoksiin verrattuna. Nämä erot tulee ottaa huomioon voimalan käytössä sekä huollossa. Tuulivoimaloita sijoitetaan paikkoihin, joissa ympäristö asettaa vaatimukset korkealle.

2.3.1 Kunnossapitoon liittyvät määritelmät

Korjaava huolto käsittää huoltotehtävät, jotka syntyvät komponenttien vikaantumisen seurauksena (Electric Power Research Institute (EPRI), 2012). Korjaavia tehtäviä syntyy, kun laitteen vikaantuminen on ei-toivottua tai suunnittelematonta. Tämä on huollon kallein muoto, sillä siinä syntyy voimalalle odottamatonta seisonta-aikaa. Yrityksen on hyvä pyrkiä vähentämään korjaavaa huoltoa käyttämällä oikeita komponentteja ennakoivassa huollossa, mutta laitteiden vikaantumisilta ei voida kokonaan välttyä.

Ennakoiva huolto sisältää huoltotehtävät, jotka suoritetaan laitteen kunnon perusteella (EPRI, 2012). Ennakoiva huolto perustuu kunnonvalvontajärjestelmiin, joilla määritetään laitteen nykyinen kunto, jotta voidaan suorittaa vain tarvittava huolto ennen laitteen vikaantumista.

Ennaltaehkäisevä huolto sisältää ne huollon tehtävät, jotka suoritetaan aikaväliperusteisesti laitteen vikaantumisen välttämiseksi (EPRI, 2012). Ennaltaehkäisevässä huollossa tehtävät suoritetaan suunnitellusti eikä reaktiivisesti. Näin pyritään välttämään suunnittelematonta voimalan seisonta aikaa. Ennaltaehkäisevän huollon haittapuolena on se, että joi-takin tehtäviä suoritetaan tarpeettomasti ja näin huoltaminen aiheuttaa tarpeettomia kuluja.

Määräaikaishuolto sisältää voimalan komponenteille suoritettavat huoltotoimenpiteet, joilla varmistetaan laitteiden toiminta laitetoimittajan määrittelemällä tavalla (EPRI, 2012). Proaktiivinen huolto sisältää tehtävät, joilla määritetään vikaantuvien laitteiden perimmäinen ongelma. Kun laitteissa esiintyy kroonisia ongelmia, ne vaativat ratkaisun löytämiseksi usein edistyneitä teknologioita. Juurisyytä voidaan etsiä myös huonosta suunnittelusta, riittämättömistä huoltokäytänteistä tai laitteen virheellisestä käytöstä.

2.3.2 Tuulivoimalassa tehtävä määräaikaishuolto

Valmistaja tai voimalan omistaja määrittelee voimalalle ennakoivan huolto-ohjelman, joka toteutetaan yleensä puolivuositain tai vuosittain (EPRI, 2012). Ennakoivassa huolto-ohjelmassa käydään usein läpi seuraavat asiat:

1. Tuulivoimalan laitteiden kalibrointi sisältää komponenttien asetusten tarkastamista ja välysten mittaamista. Voimalassa suoritetaan myös erilaisia laitteiden itsetestauksia, joilla voidaan todeta voimalan toimivan oikein.
2. Laitteiston puhdistaminen on erittäin tärkeää. Lian ja pölyn kertyminen laitteistoihin saattaa aiheuttaa suodattimien tukkeutumista sekä häiritä sensoreiden toimintaa.
3. Öljyjen ja rasvojen lisääminen tai vaihtaminen on tuulivoimalan toiminnan kannalta erittäin tärkeää. Ilmassa leijaileva pöly tai muu lika voi kontaminoida voiteluaineen ja tämän myötä esimerkiksi laakerit voivat vahingoittua.
4. Öljyanalyysi antaa tärkeää tietoa ennakoivaan huoltoon. Öljyanalyysilla voidaan tunnistaa alkavia ongelmia jo hyvissä ajoin ennen kuin ne alkavat tuottaa ongelmia voimalan toiminnalle. Tuulivoimalassa öljynäyte tulisi ottaa ainakin vaihdelaatikosta. Analyysissä tutkitaan öljyn puhtautta sekä öljyn ominaisuuksia. Tulosten perusteella voidaan päätellä, tarvitseeko voimala mahdollisesti tarkempaa seurantaa tai täytyykö komponentti vaihtaa.
5. Aistinvarainen tarkastus on yksi tärkeimmistä määräajoin tehtävistä asioista. Tämä sisältää voimalassa esiintyvien äänien kuuntelemista, haistamista esimerkiksi savun varalta tai hitsausaumojen silmäilyä. Aistinvaraisessa tarkastuksessa tulee tutkia kaikkea mikä voi olla tavallisuudesta poikkeavaa. Teknikon tulee esimerkiksi tarkistaa öljyn tasot, komponentit kadonneiden pulttien varalta sekä etsiä mahdollisia vuotoja.

2.3.3 Kunnonvalvontajärjestelmä

Tuulivoimalan kunnonvalvontajärjestelmä (CMS) on välttämätön optimaalisen suorituskyvyn kannalta (Drommi, 2021). Kunnonvalvontajärjestelmä käyttää värinä- ja kierroslukumittauksia arvioidakseen voimansiirron mekaanista kuntoa. Valittujen parametrien perusteella tiedoista analysoidaan seurattava data, jonka pohjalta kootaan tapahtumaraportit ja annetaan suosituksia ennakoivan huollon kohteista.

Kunnonvalvontajärjestelmä pystyy arvioimaan ennakoivan huollon tarpeen, jopa kuusi kuukautta ennen komponentin lopullista rikkoutumista (Vestas, 2020). Näin laitteiden osat voidaan tilata ja vaihtaa ajoissa, jolloin turbiinin seisokkiaika voidaan minimoida. Ajoissa järjestetty ennakkohuolto lieventää isojen komponenttien vahinkoja ja tuo synergiaa kunnossapidon logistiikkaan. Turbiinikohtainen parametrien räätälöinti parantaa kunnonvalvontajärjestelmän seurannan tarkkuutta. Parametrien räätälöinti perustuu kunnonvalvontajärjestelmän keräämään dataan. Tämän ansiosta voidaan tehdä tarkempia painotuksia verrattuna muihin vastaaviin voimaloihin. Tuotetun tiedon lisääntyessä seurattavat parametrit tarkentuvat ajan myötä.

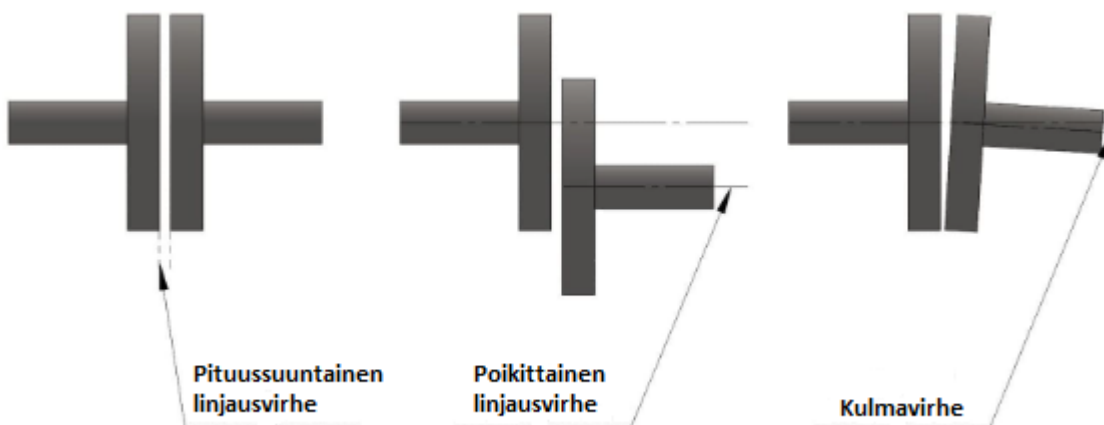
Esimerkkejä vahinkotyypeistä, joita voidaan tunnistaa kunnonvalvontajärjestelmällä (Vestas, 2020):

- Vaihdelaatikon laakerivika
- Vaihdelaatikon hammaspyörävika
- Vaihdelaatikon hankaus- ja tyhjennysongelmat
- Mekaanisen pumpun ongelmat
- Roottorin epätasapaino
- Komponenttien voitelun puute
- Generaattorin ja vaihdelaatikon välinen linjausvirhe
- Kääntöjärjestelmien viat.

Voidaan todeta, että kunnonvalvontajärjestelmän avulla pystytään seuraamaan reaaliaikaisesti voimalan mekaanista kuntoa. Kunnonvalvontajärjestelmä auttaa säästämään resursseja, kohdentamaan huolto-organisaation työvoimaa tehokkaammin ja tehostamaan kuljetusketjuja.

3 TUULIVOIMALAN GENERAATTORIN LINJAUKSEN TARPEEN MÄÄRITTÄMINEN

Tuulivoimalan käyttöympäristö on erittäin vaativa. Voimalan laitteet altistuvat jatkuvasti vaihteleville tuuliolosuhteille, lämpötilan muutoksille sekä mekaaniselle rasitukselle (Mankowski & Wang, 2013). Nämä olosuhteet yhdessä aiheuttavat ajan myötä komponenttien kulumista ja siirtymistä. Näissä olosuhteissa korostuvat tuulivoimaloiden voimansiirtorakenteen eli vaihdelaatikon ja generaattorin välisen kohdistuksen eli linjauksen merkitys. Generaattorin ja vaihdelaatikon välisessä linjauksessa, voi esiintyä pituussuuntaista, poikittaista tai kulmavirhettä (kuva 7). Linjausvirheet aiheuttavat usein ylimääräistä tärinää ja tämän myötä laakerivaurioita, jotka saattavat johtaa ylimääräisiin huoltoseisokkeihin.



Kuva 7. Linjausvirheet (perustuu Engineering Knowledge, 2023).

Linjauksen optimointi on kuitenkin haastavaa, sillä täydellistä linjausta on vaikea saavuttaa käytännössä (Mankowski & Wang, 2013). Voimalan rakenteiden jatkuva liike kuormituksen alla lisää epävarmuustekijöitä. Tästä huolimatta kirjallisuudessa on esiintynyt vain vähän tutkimusta tuulivoimaloiden linjaamisesta ja sen vaikutuksista. Tämän vuoksi linjauksen tarpeen arviointi käytännön kunnossapitotyössä on erittäin tärkeää.

3.1 Linjauksen tarkastelu työnä ja resursseina

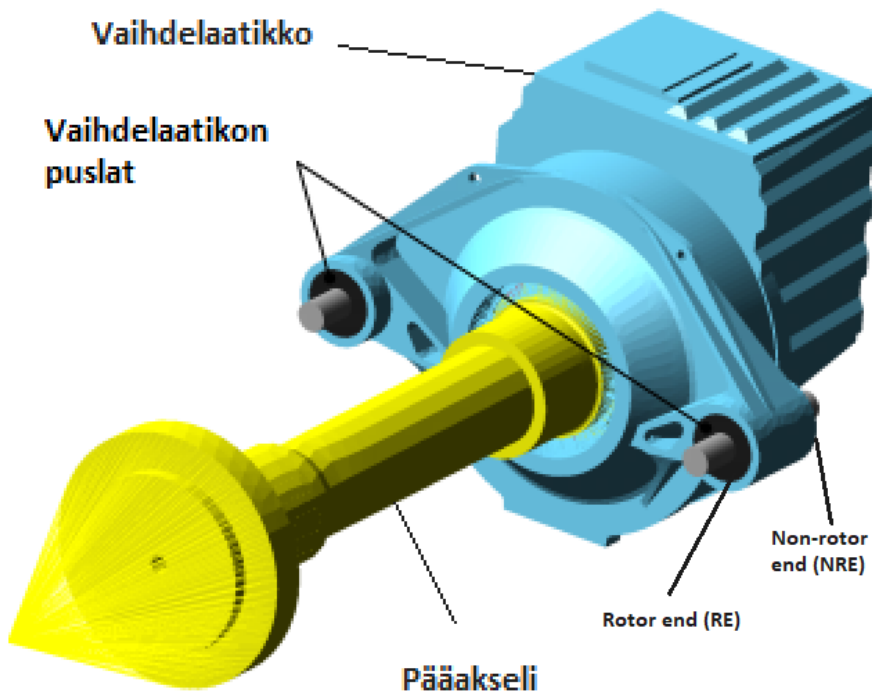
3.1.1 Nykyprosessin kuvaus

Työprosessi lähtee liikkeelle perustuen kunnonvalvontajärjestelmän tuottamaan anturidataan (Vestas, 2020). Järjestelmän esiin nostama varoitus käsitellään yrityksen etäkäyttökeskuksessa, jossa dataa arvioidaan. Etäkäyttökeskuksen seuranta- ja arviointiosasto arvioi datan perusteella, tarvitseeko vaihdelaatikko välitöntä tarkastusta. Tarkastuksen tarpeesta tehdään työmääräin, joka välitetään huoltokeskukselle, josta se välitetään edelleen tarkastuksen suorittaville huoltoteknikoille. Työmääräimestä käy ilmi työn suorituksen aikikkuna, tarvittavat työhjeet sekä teknikoiden vaadittava pätevyystaso. Työhjeista löytyvät yksityiskohtainen luettelo käytettävistä työkaluista, työvaiheista sekä arvio työhön käytettävästä ajasta.

Tutkittavaan aiheeseen liittyy kaksi erillistä työtehtävää, vaihdelaatikon puslien boreskoopilla suoritettava tarkastus sekä generaattorin linjauksen tarkastus. Teknikot suorittavat edellä mainitut tarkastukset sekä tekevät tarvittaessa generaattorille linjauksen suhteessa vaihdelaatikkoon, mikäli linjausvirhettä esiintyy. Tarkastuksessa tehdyt huomiot dokumentoidaan komponenttien tarkastusraportteihin, jotka välitetään yrityksen järjestelmän kautta aiheen asiantuntijalle. Asiantuntija tekee päätöksen mahdollisista jatkotoimenpiteistä, perustuen teknikon tekemään dokumentointiin sekä tuulivoimalan kunnonvalvontajärjestelmän tuottamaan dataan.

3.1.2 Vaihdelaatikon puslien tarkastus

Tuulivoimalan vaihdelaatikko (kuva 8) on kiinnitetty voimalan runkoon vääntövarsilla, joiden ympärillä käytetään kumipuslia (Haastrup ym., 2011). Puslien keskeinen tehtävä on toimia joustavana liitoksena vaihdelaatikon ja runkorakenteen välillä. Tämä avustaa voiman siirtymistä ja samalla vaimentaa ääntä ja tärinää.



Kuva 8. Puslien sijainti vaihdelaatikossa (perustuu Haastrup ym., 2011).

Vaihdelaatikon puslien tarkastamisessa työtehtävä suoritetaan yrityksen laatimaa työohjetta noudattaen (Vestas, i.a.-c). Työtehtävän tavoite on varmistaa vaihdelaatikon puslien kunto ennenaikaisen kulumisen varalta. Työohjeessa on määritelty esimerkein puslien kulumisen vahinkokategoriat, joiden ansiosta teknikon on helpompi tehdä alustavaa arviointia raportoinnissa.

Työtehtävä sisältää seuraavat vaiheet:

1. Työn valmistelussa teknikit käyvät läpi aiheeseen liittyvät dokumentit ja turvallisuusasiat. Turvallisuussyistä tuulivoimaloissa suoritettavat työt suoritetaan työpareina.
2. Kerätään työkalut työohjeen mukaisesti. Tämä työtehtävä vaatii teknikon peruskäsityökalut sekä boreskooppikameran. Boreskooppikamera on työkalu, jota käytetään ahtaiden paikkojen tarkasteluun ja kuvaamiseen. Se koostuu pitkästä joustavasta putkesta, jonka päässä on kamera ja valonlähde. Toisessa päässä on näyttö tai lähetin, joka välittää kuvaa esimerkiksi puhelimen näytölle.
3. Siirtyminen toimipisteeltä tuulivoimalalle.
4. Tuulivoimalan pysäytys ja teknikoiden siirtyminen ylös naselliin.

5. Lukitaan roottori, noudattaen LOTO (Lock Out, Tag Out) käytänteitä.
6. Puretaan tasot ja suojat tarkastettavien kohteiden ympäriltä.
7. Kuvataan työhjeen määrittelemällä tavalla. Kuvaamisessa on tärkeää huomioida kuvien sijainnin merkitseminen. Sijainnin merkitsemisessä käytetään merkitsemistapaa roottorin puoli (RE) ja ei-roottorin puoli (NRE) (kuva 8).
8. Asennetaan tasot ja suojat takaisin paikalleen.
9. Puretaan LOTO ja avataan roottorilukko.
10. Teknikoiden siirtyminen alas ja tuulivoimalan käynnistys.
11. Siirtyminen voimalalta toimipisteelle.
12. Raportointi ja raportin lähetys.

Yhteenvetona voidaan todeta, että raporttiin lisättävät kuvat ja tehdyt huomiot muodostavat keskeisen osan tarkastusta. Teknikon antama alustava kuntoarvio kuvien ja paikalla nähdyn perusteella luovat hyvän pohjan asiantuntijan analyysille puslien todellisesta tilasta. Näin toimimalla pystytään luomaan kattava kokonaisarvio kulumisen todellisesta tilasta.

3.1.3 Generaattorin linjaus

Generaattorin linjaus suoritetaan yrityksen laatimaa työhjetta noudattaen (Vestas, i.a.-d). Työtehtävän tavoitteena on tarkistaa ja tarvittaessa korjata generaattorin linjaus suhteessa vaihdelaatikkoon. Lisäksi työsuoritukseen käytetään työhjetta, joka opastaa linjaustyökalun asennuksen ja käytön (Vestas, i.a.-e). Kyseinen työhje käsittää myös turbiinikohtaiset parametrit ja toleranssit, jotka syötetään linjaustyökalun päätteeseen.

Työtehtävä sisältää seuraavat vaiheet:

1. Työn valmistelussa teknikot käyvät läpi aiheeseen liittyvät dokumentit ja turvallisuusasiat. Lisäksi he seuraavat tarkasti tuuliennusteita, sillä linjauksen tarkastus ja korjaus edellyttävät tyyntä säätä.
2. Kerätään työkalut työhjeen mukaisesti. Tämä työ vaatii linjaustyökalun, joka on kiinnitystarvikkeineen isokokoinen salkku. Lisäksi muita isokokoisia työkaluja ovat hydraulikkaväännin (kuva 9) ja sen paineysikkö. Hydraulikkaväännintä

käytetään generaattorin kiinnitysten avaamiseen. Muita työhön otettavia työkaluja ovat mm. hylsysarja, hydrauliiikatunkit ja puhdistustarvikkeet.

3. Siirtyminen toimipisteeltä tuulivoimalalle.
4. Tuulivoimalan pysäytys ja teknikoiden siirtyminen ylös naselliin.
5. Lukitaan roottori, tehdään muut lukitukset LOTO-käytänteiden mukaisesti.
6. Työvälineet nostetaan huoltonosturilla ylös naselliin. Työvälineet on pakattu nostosäkkeihin. Säkkien määrästä riippuen, voidaan tarvita useita nostokertoja.
7. Puretaan vaihdelaatikon ja generaattorin välillä olevan kytkimen suojakuori.
8. Puretaan vaihdelaatikon ja generaattorin välillä oleva lasikuitukytkin.
9. Mitataan vaihdelaatikon ja generaattorin väli pituussuuntaisen linjausvirheen poissulkemiseksi.
10. Asennetaan linjaustyökalun vastaanottimet vaihdelaatikon ja generaattorin päähän.
11. Kalibroidaan laser-tekniikalla mittaavat vastaanottimet linjaustyökalun päätteellä.
12. Tulos saadaan pyörittämällä generaattoria ja vaihdelaatikon päässä olevaa vastaanotinta kellotaulun mukaisesti. Mittauspisteiksi valitaan kohdat 9, 12, 3. Näin vastaanotin laskee linjauksen sekä vaaka että pystysuunnassa.
13. Mikäli linjaustyökalun antamassa tuloksessa löytyy korjattavaa, lähdetään siirtämään generaattoria työkalun antamien arvojen mukaisesti. Korjauksen ollessa vertikaalisessa suunnassa, säätö tehdään lisäämällä tai vähentämällä generaattorin jaloissa olevia säätölevyjä. Horisontaalinen suunnan korjaus tehdään generaattoriin kylkeen liitettävillä siirtotyökaluilla.
14. Tuloksen ollessa toleranssien sisällä, tallennetaan tarkastuksen pöytäkirja linjaustyökalun päätteelle.
15. Puretaan linjaustyökalun vastaanottimet.
16. Asennetaan kytkin takaisin paikalleen.
17. Asennetaan kytkimen suojakuori.
18. Pakataan työvälineet takaisin nostosäkkeihin ja lasketaan huoltonosturilla alas.
19. Puretaan LOTO-lukitukset ja avataan roottorilukko.
20. Teknikoiden siirtyminen alas ja tuulivoimalan käynnistys.
21. Siirtyminen voimalalta toimipisteelle.
22. Raportointi ja raportin lähetys. Raportoinnissa tuodaan esille tehdyt huomiot ja esitetään linjauksen tulokset ennen ja jälkeen korjauksen.

Linjauksen tarkastus vaatii paljon resursseja ja on monivaiheinen prosessi, joka edellyttää erikoistyökaluja. Raportoinnissa lähtöarvojen kirjaaminen on olennaista, sillä se mahdollistaa linjauksen mahdollisten poikkeamien seurannan tulevaisuudessa.



Kuva 9. Hydraulikkaletku, paineyksikkö ja hydraulikkaväännin.

3.2 Linjauksen tarpeen tarkastelu

Edellä kuvattujen työtehtävien perusteella vaihdelaatikon puslien tarkastus vie huomattavasti vähemmän aikaa ja resursseja kuin generaattorin linjauksen tarkastus. Opinnäytetyöntekijä on kokenut, että molemmat työmääräimet tulevat tehtäväksi saman ajan sisällä. Tämä oletama on toiminut opinnäytetyön toimeenpanevana ideana.

Opinnäytetyön hypoteesina on, että vaihdelaatikon linjauksen tarkastus tehdään usein turhaan samassa yhteydessä kuin puslien tarkastus. Tämä voi johtaa tarpeettomaan resursien käyttöön. Vaihdelaatikon puslien tarkastuksia tulee jatkaa säännöllisin väliajoin ensimmäisen tarkastuksen jälkeen, jotta voidaan seurata, jatkuuko puslien ennenaikainen kuluminen vai onko kuluminen pysähtynyt.

Tutkittavia asioita voisivat olla varoituksen antaneiden voimaloiden kunnonvalvontajärjestelmän antureiden tuottama data sekä se, onko linjausta pitänyt korjata ensimmäisen tarkastuksen yhteydessä ja kuinka paljon. Lisäksi voisi olla hyödyllistä vertailla näiden kahden työtehtävän todellisuudessa toteutettuja määriä. Ennen tutkimuksen aloittamista on tärkeää pohtia, mitä hyviä ja huonoja puolia linjauksen tarkastuksen vähentämisellä voisi olla.

Hyvät puolet:

- Vähentämällä linjausten tarkastuksia, voidaan työvoimaa ja työvälineitä suunnata muihin huoltotoimenpiteisiin, mikä parantaa kokonaistehokkuutta.
- Linjauksen tarkastuksien vähentäminen voi johtaa merkittäviin kustannussäästöihin, sillä työtehtävä vaatii huomattavasti aikaa ja erikoistyökaluja

Huonot puolet:

- Mahdollinen linjausvirhe aiheuttaa laakereiden kulumista ja muita tärinöitä, jotka lyhentävät komponenttien elinikää
- Mahdollisen linjausvirheen aiheuttamat ongelmat aiheuttavat odottamattomia huoltoseisokkeja, sitoen näin resursseja ja aiheuttaen kustannuksia asiakkaalle.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, onko linjauksen tarkastusten vähentäminen mahdollista ilman laadun heikkenemistä. Tutkimuksesta olisi hyvä käydä ilmi linjauksen laadun taso, mikäli voimalassa on käyty tekemässä linjauksen tarkastus useammin, kuinka paljon virhettä on päässyt syntymään näiden käyntien välissä.

4 MENETELMÄT

4.1 Tutkimusmenetelmän esittely

Tämän opinnäytetyön tutkimuksellinen osuus toteutettiin hyödyntäen kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Kvantitatiivinen eli tilastollinen tutkimus soveltuu hyvin sellaisten ilmiöiden analysointiin, joita pystytään ilmaisemaan numeerisesti (Heikkilä, 2014, s. 15). Menetelmän avulla pyritään keräämään ja analysoimaan määrällistä dataa, jonka pohjalta voidaan tehdä yleistettäviä johtopäätöksiä tutkittavassa ilmiössä tapahtuneista muutoksista. Saatuja tuloksia voidaan havainnollistaa taulukoilla ja kuvioilla.

Kvantitatiivisessa tutkimuksessa tietoa voidaan hankkia olemassa olevista tilastoista ja rekistereistä tai vaihtoehtoisesti aineisto voidaan kerätä itse (Heikkilä, 2014, s. 16). On kuitenkin huomioitava, että valmiit aineistot ovat usein muodoltaan sellaisia, että ne vaativat muokkausta ja yhdistelyä ennen kvantitatiivisen menetelmän soveltumista. Tässä opinnäytetyössä kvantitatiivisen menetelmän valinta perustui tarpeeseen analysoida saatavilla olevaa numeerista dataa johdonmukaisesti, jotta voitaisiin tunnistaa mahdollisia tilastollisia yhteyksiä ja tehdä niihin perustuvia päätelmiä.

4.2 Pohja-aineiston tutkiminen

Tutkimuksen pohja-aineistona hyödynnettiin yrityksen tietyn määritellyn case-tapauksen komponentin tarkastusraportteja, joissa käsiteltiin generaattorin linjauksen tarkastusta ja mahdollisia linjauksen korjauksia. Nämä tapaukset liittyivät pääasiassa toiseen rinnakkaiseen case-tapaukseen, jossa seurattiin vaihdelaatikon puslien kulumista. Näiden kahden tapauksen välinen yhteys tarjosi laajemman näkökulman tutkittavien ilmiöiden analysointiin.

Raportit kerättiin yrityksen komponenttien tarkastuspöytäkirjojen hakemistosta. Haku rajoitettiin yhteen voimalamalliin ja siihen sisällytettiin ainoastaan Suomessa sijaitseviin voimaloihin liittyvät raportit. Hakemistosta kerättiin myös molempien yllä mainittujen case-tapausten raporttien yhteenvetotaulukot. Näistä taulukoista ilmenivät muun muassa raportin nimi, kirjauspäivämäärä, tuulivoimapuiston nimi sekä voimalan numero.

Raporttien perusteella luotiin taulukko (liite 1). Tämän taulukon pohjana hyödynnettiin hakemistosta saatua yhteenvetoa, jota täydennettiin yksityiskohtaisemmalla tiedolla suoraan raporteista. Raporteista poimittiin tutkimuksen kannalta oleellista tietoa. Taulukon suunnittelussa otettiin huomioon myös työnantajan mahdolliset tarpeet. Tästä syystä taulukon sarakkeiden nimet ovat englanniksi ja siihen on kirjattu myös havaintoja, jotka eivät ole välttämättä keskeisiä tämän tutkimuksen tavoitteiden kannalta.

Taulukosta löytyvät seuraavat tiedot:

1. Raportin tunnistenumero.
2. Raportin päivämäärä.
3. Raportin tekijä.
4. Tuulivoimapuiston nimi.
5. Voimalan tunnistenumero.
6. Tarkastuksen suorituspäivämäärä.
7. Kunnonvalvontajärjestelmän antaman hälytyksen taso.
8. Raporttiin liittyvän vaihdelaatikon puslien tarkastusraportin tunnistenumero.
9. Generaattorin linjausvirhe pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa ennen korjausta.
10. Generaattorin linjausvirhe pystysuuntaisessa kulmassa ennen korjausta.
11. Linjausvirhe sivuttaissuuntaisessa poikittaissuunnassa ennen korjausta.
12. Linjausvirhe sivuttaissuuntaisessa kulmassa ennen korjausta.
13. Linjausvirhe pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa korjauksen jälkeen.
14. Linjausvirhe pystysuuntaisessa kulmassa korjauksen jälkeen.
15. Linjausvirhe sivuttaissuuntaisessa poikittaissuunnassa korjauksen jälkeen.
16. Linjausvirhe sivuttaissuuntaisessa kulmassa korjauksen jälkeen.
17. Linjaus oli toleranssien sisällä tarkastuksen yhteydessä.
18. Raportti ei liity vaihdelaatikon puslien tarkastukseen.
19. Muut huomiot, jossa on tuotu ilmi, jos raportista on löytynyt mielenkiintoinen huomio.

Tutkimuksen tavoitteena oli analysoida aineistosta kunnonvalvontajärjestelmän antaman hälytyksen yhteyttä todelliseen linjausvirheiden korjaustarpeeseen. Opinnäytetyössä

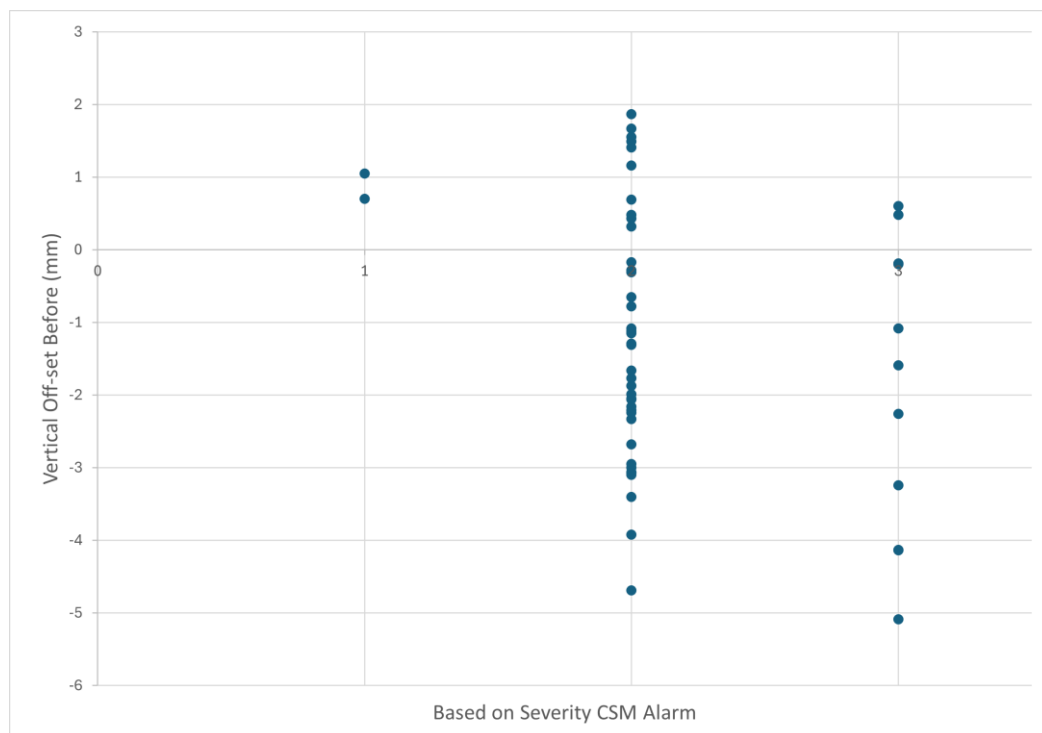
haluttiin myös tutkia, kuinka paljon linjausvirheen korjaamista oli tehty. Tutkimus haki vastausta myös siihen, kuinka paljon tarkastuksia tehtiin ilman että linjausta oli tarve korjata.

5 TULOKSET

5.1 Keskeiset tutkimustulokset

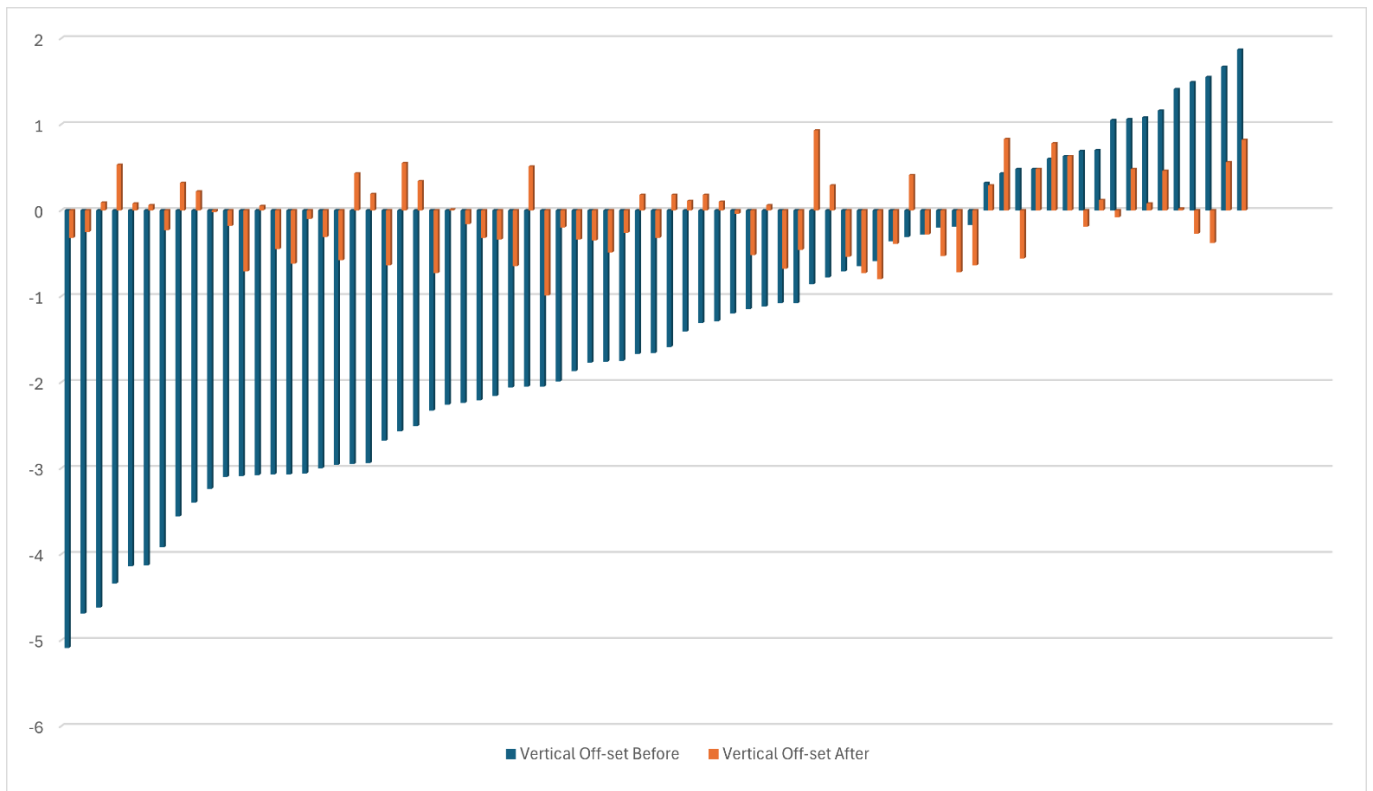
Tutkimuksen tavoitteena oli analysoida kunnonvalvontajärjestelmän antaman hälytyksen yhteyttä linjausvirheiden korjaustarpeeseen. Oletettiin, että mitä suurempi hälytystason numero on, sitä enemmän tärinä poikkeaa normaaleista arvoista. Raporttien perusteella luodun taulukon (liite 1) analyysi osoittaa, että hälytystaso 2 on yleisin, kun taas hälytystasot 1 ja 3 esiintyvät harvemmin.

Taulukkoon rajattiin lisäksi ne raportit, joissa oli lukema sarakkeessa generaattorin linjausvirhe pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa ennen korjausta. Tämä sarake valittiin, sillä taulukosta nähtiin, että linjausvirhe on ollut tässä suunnassa selvästi suurinta. Tutkimuksessa havaittiin negatiivinen korrelaatio (-0,235) pystysuuntaisen poikittaisvirheen ja hälytystason välillä. Havaittu korrelaatio osoittaa heikkoa negatiivista lineaarista yhteyttä, mutta suhde tutkittujen sarakkeiden välillä ei ole vahva. Näin heikko korrelaatio viittaa siihen, että generaattorin linjauksen virheen suuruudesta ei voida tehdä johtopäätöksiä kunnonvalvontajärjestelmän hälytystason perusteella (kuvio 1).



Kuvio 1. Linjausvirheiden jakautuminen kunnonvalvontajärjestelmän eri hälytystasoilla.

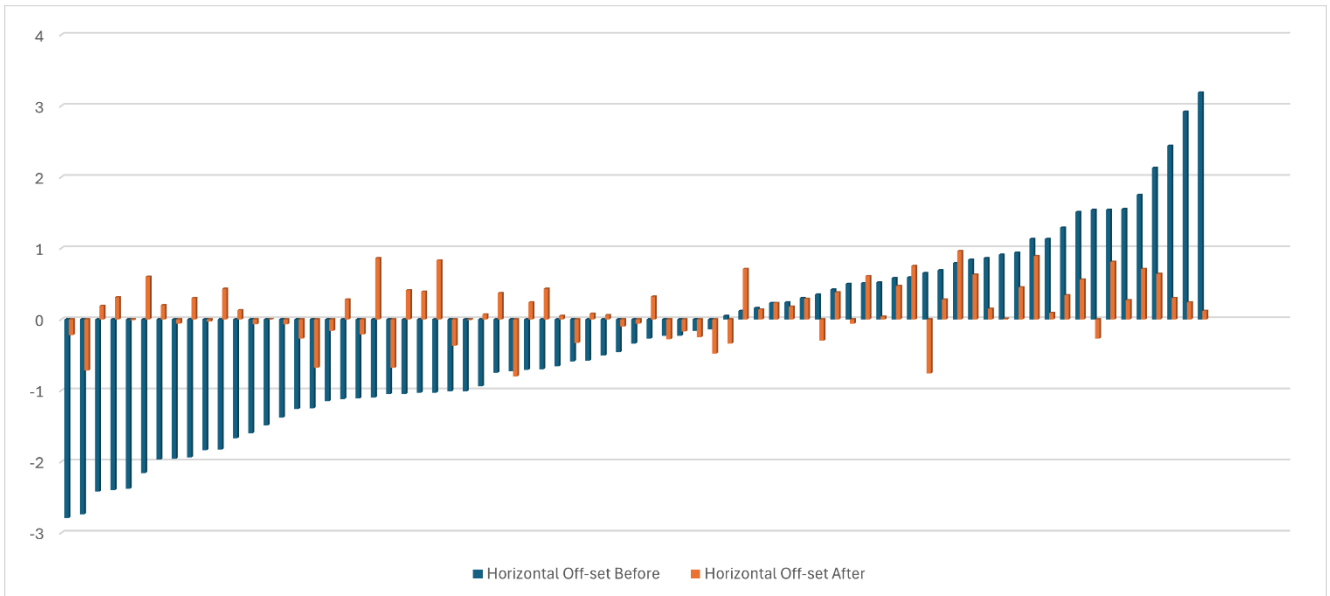
Tutkimuksessa pyrittiin myös havainnollistamaan, paljonko linjauksen korjausta oli tehty niissä tapauksissa, kun linjausta oli ollut tarpeen korjata. Taulukkoon rajattiin ne raportit, joissa linjausta oli korjattu. Kuvio 2 havainnollistaa linjausvirheet pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa ja kuvio 3 linjausvirheet sivuttaissuuntaisessa poikittaissuunnassa. Kuvioissa esiintyvät numerot kuvaavat virhettä millimetreissä, numeron mahdollinen etumerkki sitä, mihin suuntaan virhettä on verrattaessa optimitasoon eli nollaan. Kuvion 3 palkin arvon ollessa negatiivinen, generaattori on edestä katsoen oikealla verrattaessa optimilinjaan. Siniset palkit kuvaavat linjausvirhettä ennen korjausta ja oranssit korjauksen jälkeen. Kuvioita analysoitaessa on olennaista tietää poikittaisvirheen yhden millimetrin toleranssi, joka ohjaa korjaustoimenpiteitä siten, että lopullinen virhe alittaa tämän rajan. Koska raporttien mukaiset kulmavirheet ovat molemmissa suunnissa vähäisiä, niitä ei havainnollisteta tässä tutkimuksessa.



Kuvio 2. Generaattorin linjausvirhe pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa.

Analysoimalla kuviota 2, voidaan todeta, että suurin osa arvoista on negatiivisia. Tämä tarkoittaa sitä, että generaattoria on pitänyt suurella osalla linjauksia nostaa. Negatiiviset linjausvirheet ovat myös itseisarvoltaan pääasiassa suurempia verrattaessa niihin

linjauksiin, joissa generaattoria oli pitänyt laskea. Kuviosta 2 myös nähdään, että linjausvirhe korjauksen jälkeen on aina toleranssin sisällä. Linjausvirhettä ei siis pyritä saamaan tarkalleen optimitasolle.



Kuvio 3. Generaattorin linjausvirhe sivuttaissuunnassa poikittaissuunnassa.

Kuviosta 3 ilmenee, että sivuttaissuunnassa poikittaissuunnassa linjausvirhettä esiintyy enemmän niin, että generaattori on optimilinjan nähden oikealla puolella. Suurimmat linjausvirheet ovat lähes yhtä suuria optimilinjan molemmilla puolilla. Huomattava osa linjauksista on ollut valmiiksi toleranssissa. Tarkasteltaessa linjausvirhettä korjauksen jälkeen, voidaan huomata, että osa linjausvirheistä on siirtynyt optimilinjan toiselle puolelle.

Tutkimuksen tavoitteena oli myös selvittää, kuinka usein generaattorin linjauksen tarkastuksissa havaittiin sen olevan täysin toleranssin sisällä, jolloin uudelleenlinjausta ei tarvittu. Tämä selvitettiin laskemalla raporteista toleranssin sisällä olevien linjausvirheiden prosenttiosuus kaikista tutkituista linjausvirheistä. Laskelmaan eivät sisällyneet ne tulokset, joissa ei tarkasteltu samalla vaihdelaatikon puslien kuntoa. Tämä prosenttiosuus laskettiin kaavasta

$$\left(\frac{\text{Toleranssin sisällä olevien tarkastusten määrä}}{\text{Analysoitavien raporttien määrä}} \right) * 100\%.$$

Tästä kaavasta saatiin tulokseksi noin yhdeksän prosenttia. Tämän analyysin perusteella voitiin tehdä johtopäätös, että noin joka kymmenes tarkastus ei edellyttänyt linjausvirheen korjausta. Tuloksen analysoinnissa hyödynnettiin lukua 3.1.3 Generaattorin linjaus. Tarkastustyöstä jätettiin siis pois generaattorin linjauksen korjaus, jos linjausvirhe oli toleranssin sisällä.

5.2 Tutkimustulosten arviointi

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko kunnonvalvontajärjestelmän antamalla hälytystasolla yhteyttä generaattorin linjaustarpeeseen. Alkuhypoteesina toimi oletama, että korkeampi hälytystaso indikoi suurempaa poikkeamaa generaattorin linjauksessa suhteessa linjauksen optimitasoon. Analysoitaessa linjausvirheiden jakautumista kunnonvalvontajärjestelmän eri hälytystasoilla voitiin nähdä, että suurin osa tuloksista oli sijoittunut hälytystasolle 2, kun taas tasot 1 ja 3 olivat harvinaisempia (kuvio 1).

Tuloksista laskettu korrelaatiokerroin kunnonvalvontajärjestelmän hälytystason ja linjausvirheen korjaustarpeen välillä osoitti heikkoa negatiivista korrelaatiota (-0,235), kun hälytystasoa verrattiin generaattorin linjausvirheeseen pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa ennen korjausta. Tämä alhainen korrelaatio viittaa siihen, ettei näiden muuttujien välillä ole suoraa ja vahvaa lineaarista riippuvuutta, mikä käytännössä tarkoittaa, ettei kunnonvalvontajärjestelmän hälytystason perusteella voida luotettavasti päätellä generaattorin linjausvirheen suuruutta. Tutkimustulos ei siten tue hypoteesia, jonka mukaan näillä analysoiduilla asioilla olisi merkittävä yhteys.

Analysoitaessa generaattorin linjausvirhettä pystysuuntaisessa poikittaissuunnassa havaittiin, että generaattoria on pitänyt tarkastusten yhteydessä nostaa suhteessa optimilinjaan (kuvio 2). Tarkasteltaessa tapauksia, joissa linjausvirheet olivat optimilinjan yläpuolella, tehtiin havainto, että noin puolet tuloksista oli lähtökohtaisesti toleranssin sisällä. Optimilinjan alapuolisissa linjausvirheissä toleranssin sisällä olevia linjausvirheitä oli suhteellisesti vähemmän. Suurin osa linjausvirheistä jäi optimilinjan alapuolelle. Tästä herää kysymys: Aiheuttaako vaihdelaatikon puslien kulumisen vaihdelaatikon liikkumisen niin, että generaattorin linjausvirhe jää alas suhteessa vaihdelaatikkoon?

Analysoitaessa generaattorin linjausvirhettä sivuttaissuuntaisessa poikittaissuunnassa, voitiin havainnoida, että linjausvirhe jakaantuu melko tasaisesti optimilinjan molemmiin puolin. Isoimmat linjausvirheet sijoittuvat lähes yhtä kauas optimitasosta. Tästä tehtiin arvio, että generaattorin kiinnitykset rajoittavat generaattorin liikettä sivuttaissuunnassa.

Verratessa kuviota 3 kuvioon 2 voitiin todeta, että isoimmat linjausvirheet jäävät huomattavasti pienemmiksi sivuttaissuunnassa kuin pystysuunnassa. Analysoimalla molempia kuvioita nähdään myös, että osa toleranssin sisällä olevista linjausvirheistä voivat korjauksen jälkeen siirtyä kauemmaksi optimikohdasta. Joissakin tapauksissa linjausvirhe voi korjauksen jälkeen siirtyä myös optimilinjan toiselle puolelle. Sama huomio voitiin nähdä myös analysoitaessa linjausvirheitä toisinpäin. Tästä arvioitiin, että korjaustyön yhteydessä korjattaessa esimerkiksi pystysuuntaista virhettä, generaattori voi liikkua myös sivuttaissuunnassa. Asiaa voisi tutkia tarkemmin kokoamalla analysoitavasta taulukosta kuvion, jossa esiteltäisiin molemmat generaattorin suunnat raporttikohtaisesti.

Tutkimuksessa laskettiin, että linjauksen korjausta tarvittiin noin 90 % kaikista tarkastuksista. Tästä tehtiin johtopäätös, että kunnonvalvontajärjestelmän hälytys liittyy vahvasti linjauksen korjaustarpeeseen. Linjauksen korjaustarvetta voisi myös tutkia tutustumalla vaihdelaatikon puslien tarkastusraportteihin ja laskea korrelaatiokertoimen puslien kulumisen ja linjausvirheen välillä. Tämä olisi vaikea toteuttaa, koska puslien kulumisen arvioidaan ainoastaan silmämääräisesti. Tutkimuksen tulosten perusteella voidaan tutkimuksen päähypoteesi siitä, että linjauksen tarkastuksia tehdään turhaan, todeta virheelliseksi.

Tutkimuksen luotettavuutta arvioitaessa on huomioitava mahdolliset virhelähteet. Raporttien laadussa oli havaittavissa eroja linjaustulosten kirjaamistavoissa. Osassa raporteista tulos oli kirjattu ainoastaan mittalaitteen yhdessä asennossa, kun taas osa tuloksista oli mitattu sekä pysty- että sivusuunnasta. Vaikka päätelaite näyttää molempien suuntien tulokset toleranssin sisällä yhdessäkin asennossa, herättää tämä kysymyksen siitä, kuinka paljon tulos mahdollisesti muuttuu toisesta asennosta mitattaessa. Raporttien sisältämät tiedot kirjattiin taulukkoon käsin. Kirjattavat arvot olivat samantapaisia ja kirjattavia raporteja oli paljon. Tämä lisää todennäköisyyttä myös kirjaamisvirheille.

6 YHTEENVETO JA OMAT POHDINNAT

6.1 Yhteenveto

Vaikka tutkimus ei osoittanutkaan vahvaa korrelaatiota kunnonvalvontajärjestelmän hälytystason ja generaattorin korjaustarpeen välillä, se tuotti silti merkittäviä havaintoja. Erityisesti korkea korjaustarve (noin 90 % raporteista) viittaa siihen, että kunnonvalvontajärjestelmän hälytykset kuitenkin heijastavat todellista tarvetta linjausten korjaamiselle. Tämä puolestaan tukee linjaustarkastusten tärkeyttä ja kumoaa alkuperäisen oletuksen niiden mahdollisesta turhuudesta.

Tutkimuksen konkreettiset hyödyt resurssien suunnittelussa ilmenevät linjaustarkastusten korkeassa korjaustarpeessa. Vaikka kunnonvalvontajärjestelmän hälytystaso ei suoraan korreloi korjaustarpeen suuruuden kanssa, niin toimii se kuitenkin merkittävänä indikaattorina tarpeesta suorittaa linjauksen korjaamista. Tämä tieto auttaa työsuunnittelussa. Resursseja suunnitellessa on syytä varautua siihen, että valtaosa tarkastuskäynneistä johtaa myös linjauksen korjaustarpeeseen. Havainto siitä, että pystysuuntaiset linjausvirheet ovat yleisempiä ja suurempia kuin sivuttaissuuntaiset, voivat ohjata resurssien kohdentamista. Huoltoteknikoiden on oltava erityisen valmiita pystysuuntaisen linjausvirheen korjaamiseen. Korjaustöihin on varattava riittävästi aikaa molempien suuntien tarkan ja laadukkaan linjauksen varmistamiseksi.

6.2 Kehittämisehdotukset

Kehittämisehdotuksena voisi olla kunnonvalvontajärjestelmän tuottaman datan arvioinnin parametrien tutkiminen ja säätäminen. Tulisi tutkia mahdollisuutta luoda tarkempia hälytystasoja tai indikaattoreita. Tämä voisi sisältää lisäparametrejä tai painotuksia, jotka heijastavat paremmin linjausvirheen korjaustarpeen suuruutta. Tarkemmilla kunnonvalvonnan parametreillä pyrittäisiin vähentämään niitä linjaustarkastuksia, joissa korjauksia ei tarvitse tehdä linjauksen ollessa toleranssin sisällä. Kehittämisen kohteena voisivat olla yhtenäisemmät raportointikäytännöt. Havaittujen kirjaamiserojen vuoksi linjaustulosten raportointiin tulisi luoda yhtenäiset ja selkeät ohjeet. Tämä varmistaisi, että kaikki olennaiset tiedot kirjataan systemaattisesti ja vertailukelpoisesti.

Lisätutkimusta tarvitaan vaihdelaatikon puslien kulumisen vaikutuksesta linjaustarpeeseen. Tutkimusta voitaisiin jatkaa selvittämällä vaihdelaatikon puslien kulumisen todellista vaikutusta generaattorin pystysuuntaiseen linjaukseen. Tähän voisi sisältyä puslien kunnan tarkempia mittausten menetelmiä, ja näiden menetelmien tuottamien tuloksien korrelaatiota suhteessa linjausvirheisiin. Toinen aihe, josta voisi tehdä lisätutkimusta, on toleranssirajojen arviointi. Tutkimuksessa havaittiin, että osa linjausvirheistä oli toleranssin sisällä tarkastuksen yhteydessä. Onko toleranssi oikein asetettu vai voisiko se olla suurempi ilman, että se vaarantaisi generaattorin toimintaa? Tämä voisi vähentää turhien korjausten määrää.

6.3 Ammatillinen kehittyminen

Tämän opinnäytetyön tekeminen on ollut mielenkiintoinen askel opinnäytetyön tekijän ammatillisessa kehittämisessä. Prosessi on syventänyt tekijän ymmärrystä tuulivoimalan generaattorin linjauksen teoriasta ja tuonut näkemyksiä käytännön tekemiseen. Mahdollisuus tehdä opinnäytetyö kiinnostavasta aiheesta toi paljon motivaatiota työn tekemiseen. Samalla opinnäytetyöntekijän työelämätaidot kehittyivät huomattavasti.

Opinnäytetyön alkuvaiheessa erityisesti tiedonhaku tuntui haastavalta. Opinnäytetyöntekijällä on vuosikymmenen kokemus tuulivoima-alalta ja tämän myötä aihealue oli tuttu. Tämä ei kuitenkaan helpottanut tiedon hakua. Asiat, joita opinnäytetyön teoriaosassa haluttiin käsitellä, olivat tekijän mielestä tärkeitä ja laadukkaiden lähteiden löytäminen tuntui aluksi työläältä. Laadukkaiden lähteiden määrä suomeksi oli myös yllättävän vähäistä. Kuitenkin systemaattinen tiedonhaku ja lähteiden kriittinen analyysi ovat vahvistuneet tämän projektin myötä. Opinnäytetyön aiheen rajaus oli kohtuullisen selkeää, vaikka opinnäytetyön edetessä ilmeni seikkoja, joita olisi ollut mielenkiintoista käsitellä enemmän myöskin tässä työssä.

Opinnäytetyöntekijä on kehittynyt tämän prosessin myötä projektinhallintataidoissa, kuten aikatauluttamisessa, tavoitteiden asettamisessa ja niissä pysymisessä. Opinnäytetyön tekeminen tekijän päivätoiden ohella opetti priorisoimaan tehtäviä ja kehittämään projektinhallintaa. Opinnäytetyön tekeminen on kehittänyt teknillisen kirjallisuuden kriittistä tarkastelua.

Opinnäytetyön ohjaajalta Heikki Kokkoselta saatu ohjaus on ollut erittäin tärkeää. Hänen nopea vastaamisensa, saatu rakentava palaute sekä kannustus ovat auttaneet tämän prosessin eteenpäin viemistä, ja ohjanneet tekijää täyttämään itsellensä asettamat tavoitteet opinnäytetyöhön liittyen. Tekijä haluaa kiittää myös saamastaan tuesta Marjo Suonviertä, joka toimi yrityksen edustajana tässä opinnäytetyössä. Marjon antamat ammatilliset näkemykset olivat suuri tuki ja antoivat tekijälle luottamusta tämän opinnäytetyön tekemiseen.

Tämä opinnäytetyö on antanut tekijälleen hyvää oppia työuralle, joka liittyy tuulivoimalan huollon ja komponenttien asiantuntijatehtäviin. Tekijä on saanut konkreettista kokemusta tilastoaineiston käsittelemiseen ja raportointiin sekä näkökulmia työprosessien parantamiseen. Opinnäytetyön tekijä on myös tiedostanut paremmin omia vahvuuksiaan sekä kehittämistarpeitaan, jotka edesauttavat ammatillista kehittymistä myös jatkossa.

LÄHTEET

- BGB. (i.a.). *Wind turbine parts: An overview* | BGB innovation. www.bgbinnovation.com.
<https://www.bgbinnovation.com/knowledge/news-and-articles/wind-turbine-parts-an-overview>
- Breeze, P. (2016). *Wind power generation*. Academic press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804038-6.00005-0>
- Cui, Y.-F., Zhang, Y.-H., He, W.-D., & Dong, L.-J. (2024). Temperature Prediction for 3 MW Wind-Turbine Gearbox Based on Thermal Network Model. *Machines*, 12(3), 175–175. <https://doi.org/10.3390/machines12030175>
- Demurtas, G. (2021). *The hub is the part of a wind turbine that connects the blades to the main shaft* [Postaus]. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/wind-turbine-hub-design-which-best-giorgio-demurtas/>
- Drommi, F. (2021). *Mobile condition monitoring of wind turbines*. Technology Magazine from SKF. <https://evolution.skf.com/a-mobile-alternative-to-monitor-wind-turbines>
- Engineering Knowledge. (2023). *Common types of shaft misalignment*. <https://www.mecanically.com/2023/11/types-of-shaft-misalignment.html>
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2012). *Wind Turbine Maintenance Guide*. <https://www.epri.com/research/products/1024891>
- European Commission. (2020). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU*.
- Feng, Y., Qiu, Y., Crabtree, C. J., Long, H., & Tavner, P. J. (2012). Monitoring wind turbine gearboxes. *Wind Energy*, 16(5), 728–740. <https://doi.org/10.1002/we.1521>
- Garrett, P., & Rønde, K. (2012). Life cycle assessment of wind power: comprehensive results from a state-of-the-art approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(1), 37–48. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0445-4>
- Haastrup, M., Hansen, M. R., & Ebbesen, M. K. (2011). Modeling of Wind Turbine Gearbox Mounting. *Modeling, Identification and Control: A Norwegian Research Bulletin*, 32(4), 141–149. <https://doi.org/10.4173/mic.2011.4.2>
- Hans. (04.12.2011). Wind turbine energy [valokuva]. Pixabay. <https://pixabay.com/photos/wind-turbine-wind-energy-wind-power-10629/>

- Heikkilä, T. (2014). *Tilastollinen tutkimus* (9. p.). Edita.
- Kauppinen, J. (2018). *Turbiinitekniikka*. Tammertekniikka.
- Kim, M-G., & Dalhoff, P. H. (2014). Yaw systems for wind turbines – Overview of concepts, current challenges and design methods. *Journal of Physics: Conference Series*, 524, artikkeli 012086. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012086>
- Korpela, A. (2016). *Tuulivoiman perusteet*. Tammertekniikka.
- Linde, H. (17.9.2017). *Pinwheels windmill construction* [valokuva]. Pixabay. <https://pixabay.com/photos/pinwheels-windmill-construction-site-2759585/>
- Maersk Training. (i.a.). *What is a nacelle in wind turbines?* insights/industry-insights-blog/what-is-a-nacelle-in-wind-turbines
- Mankowski, O., & Wang, Q. (2013). Real-time monitoring of wind turbine generator shaft alignment using laser measurement. *Procedia CIRP*, 11, 291–295. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.07.019>
- Motiva. (i.a.). *Tuulivoimateknologia*. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia
- Palmu, K. (2016). *Tuulivoimaloiden huoltokäytännöt Saksassa*. Prizztech. <https://www.prizz.fi/media/energiaratkaisut/energiaratkaisut-materiaalit/tuulivoimaloiden-huoltokaytannot-saksassa.pdf>
- Sirviö, A. (2022). *Tuulivoiman standardointi*. Sesko. <https://sesko.fi/wp-content/uploads/2022/08/Puhdas-Energia-Tuulivoiman-standardointi.pdf>
- Stavridou, N., Koltsakis, E., & C. Baniotopoulos, C. (2020). Lattice and tubular steel wind turbine towers. Comparative structural investigation. *Energies*, 13(23), 6325. <https://doi.org/10.3390/en13236325>
- Suomen Asiakastieto. (2024). *Vestas Finland Oy taloustiedot*. Asiakastieto.fi. <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/vestas-finland-oy/24178401/taloustiedot>
- Suomen uusiutuvat. (2025, s.11). *Tuulivoima Suomessa 31.12.2024* [PowerPoint-esitys]. https://suomenuusiutuvat.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2024.pdf
- Tvindkraft. (i.a.). *A pioneer of wind energy: Tvindkraft*. <https://www.tvindkraft.dk/what-is-tvindkraft-a-pioneer-of-wind-energy/>

Vestas Wind Systems (Vestas). (i.a.-a). *Offshore wind turbines*
<https://www.vestas.com/en/energy-solutions/offshore-wind-turbines>

Vestas Wind Systems (Vestas). (i.a.-b). *Onshore wind turbines*
<https://www.vestas.com/en/energy-solutions/onshore-wind-turbines>

Vestas Wind Systems (Vestas). (i.a.-c). *Inspection of the torque arm bushing* [Työohje]. Saatavilla vain yrityksen sisäisessä käytössä.

Vestas Wind Systems (Vestas). (i.a.-d). *CMS work instruction* [Työohje]. Saatavilla vain yrityksen sisäisessä käytössä.

Vestas Wind Systems (Vestas). (i.a.-e). *Ohje linjaustyökalun käyttöön* [Työohje]. Saatavilla vain yrityksen sisäisessä käytössä.

Vestas Wind Systems (Vestas). (2020) *Vestas Condition Monitoring Solution* [PowerPointesitys]. Saatavilla vain yrityksen sisäisessä käytössä.

Vestas Wind Systems (Vestas). (2025). *Annual Report 2024*.
<https://www.vestas.com/content/dam/vestas-com/global/en/investor/reports-and-presentations/financial/2024/fy-2024/Vestas%20Annual%20Report%202024.pdf.coredownload.inline.pdf>

LIITTEET

Liite 1. Generaattorin linjauksen tarkastusraporttien yhteenvetotaulukko. (Saatavilla vain yrityksen sisäisessä käytössä.)