

Akseli Annola

TUULIVOIMALAN SIIVENKÄÄNTÖHAMMASTUKSEN VAURIOT

TUULIVOIMALAN SIIVENKÄÄNTÖHAMMASTUKSEN VAURIOT

Akseli Annola
Opinnäytetyö
Kevät 2022
Konetekniikka
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma

Tekijä: Akseli Annola

Opinnäytetyön nimi: Tuulivoimalan siivenkääntöhammastuksen vauriot

Opinnäytetyön englanninkielinen nimi: Worn out pitch gears of wind turbines

Työn ohjaaja: Juha Männistö

Työn valmistuslukukausi ja -vuosi: kevät 2022

Sivumäärä: 41 + 1 liite

Opinnäytetyö tehtiin FCG Finnish Consulting Group Oy:lle. Työn aiheena olivat tuulivoimaloissa käytettävät siivenkääntöjärjestelmät sekä tutkimus avohammaskäyttöisen siivenkäännön ongelmatilanteista, joissa hammastus voi kulua tai muuten vaurioitua ennen aikaisesti.

Tutkimusta varten vierailtiin lukuisissa eri voimalatyypeissä, joissa havainnoitiin järjestelmien ominaisuuksia sekä niiden kuntoa lukuisissa eri voimaloiden elinkaarivaiheissa. Tavoitteena oli tutkia olemassa olevia tilanteita, joissa hammastus on vaurioitunut, ja näiden perusteella tunnistaa mahdollisia riskitekijöitä, jotka voisivat olla vältettävissä elinkaarensa alussa olevissa voimaloissa. Lisäksi tavoitteena oli laatia ohjeistuksia, joilla voitaisiin pidentää jo vaurioituneiden hampaiden käyttöikä.

Johtopäätöksissä todettiin hampaiden kulumisen olevan laitteiston toiminnan takia sille ominaisuus, jolloin kulumisen voi kiihtyä huomattavasti, mikäli laitteistoa ei ole säädetty oikein tai sen ylläpitoa laiminlyödään. Varteenotettavin ongelma on, että hampaiden kuntoon ei osata kiinnittää riittävä huomiota. Ennen aikainen hampaiden vaurioituminen on vältettävissä, mikäli poikkeava kulumisen tai sitä ennustavat tekijät havaitaan ja kulumista aiheuttavaan ongelmaan vastataan riittävän ajoissa.

Työn tuloksena johtopäätöksissä esitettiin todennäköisimpiä riskitekijöitä siivenkäännön hammastuksen vaurioitumiselle. Lisäksi lopputuloksissa annettiin suosituksia vaurioiden välttämiseksi, sekä jo ennen aikaisesti vaurioituneiden hampaiden kulumisen hidastamiseksi.

Asiasanat: siivenkääntö, hammastus, vauriot, kulumisen, tuulivoimala

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Degree programme of Mechanical Engineering

Author: Akseli Annola
Title of thesis: Worn out pitch gears of wind turbines
Supervisor: Juha Männistö
Term and year when the thesis was submitted: spring, 2022
Number of pages: 41pcs + 1 appendix

This thesis has been made for FCG Finnish Consulting Group Oy. The subject is from blade pitching systems used in wind turbines and investigation of a problem from open gears of pitch systems, where the teeth could wear out prematurely.

Based to investigation, a multiple of different turbine types has been inspected, where the characteristics of each system were studied during multiple different operational life cycle stages. The aim was to analyze the risks what may cause the wear and to create guidelines for preventing them.

The results highlighted the scale of the problem and indicated that the wear of the teeth can be seen as feature of the system where any deviation may accelerate the wear considerably. Guidelines were given to avoid the wear to occur on turbines where the wear is not yet an issue and to help slow down the premature wear where it is already present.

Keywords: pitch system, open gears, ring gear, premature wear, wind turbine

ALKULAUSE

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä useiden eri tuulivoimaloita hallinnoivien ja huoltavien organisaatioiden kesken. Reunaehtona sovittiin, ettei työtä kohdistettaisi mihinkään tiettyihin voimalavalmistajiin tai voimaloita hallinnoiviin organisaatioihin.

Tekijä kiittää toimeksiantajaa FCG Finnish Consulting Group Oy:tä ja tuulivoimaloita hallinnoivia sekä huoltavia organisaatioita työn mahdollistamisesta sekä annetusta tuesta.

Oulussa 4.5.2022

Akseli Annola

SISÄLLYS

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | JOHDANTO | 9 |
| 2 | TUULIVOIMALA | 10 |
| 2.1 | Konehuone | 10 |
| 2.2 | Napa | 10 |
| 2.3 | Siivet | 11 |
| 2.4 | Torni | 11 |
| 2.5 | Teräslohkotorni | 11 |
| 2.6 | Hybrid-torni | 11 |
| 3 | SIIVENKÄÄNTÖ TUULIVOIMALOISSA | 12 |
| 3.1 | Siivenkäännön ohjausjärjestelmät | 12 |
| 3.2 | Siivenkäännön mekaaninen toteutus hydraulikalla | 13 |
| 3.3 | Hydraulisen siivenkäännön edut | 14 |
| 3.4 | Hydraulisen siivenkäännön haitat | 14 |
| 3.5 | Siivenkäännön mekaaninen toteutus sähkökäytöllä | 14 |
| 3.6 | Sähkökäyttöisen siivenkäännön edut | 15 |
| 3.7 | Sähkökäyttöisen siivenkäännön haitat | 16 |
| 3.8 | Sähkökäyttöisen siivenkäännön työalue | 16 |
| 4 | RASVAVOITELU | 18 |
| 4.1 | Saennin | 18 |
| 4.2 | Perusöljy | 18 |
| 4.3 | Lisäaineet | 18 |
| 4.4 | Avohammastuksen voitelu | 19 |
| 4.5 | Automaattivoitelu | 19 |
| 4.6 | Rasvan syöttö seuraavalla levittäjäpinionilla | 20 |
| 5 | HAMMASPYÖRÄT | 21 |
| 5.1 | Siivenkäännön hammastus | 21 |
| 5.2 | Komponenttitason muodonmuutokset sekä hammaskosketus | 22 |
| 5.3 | Hammastuksen karkaisu | 24 |
| 6 | KULUMISTILANTEIDEN TARKASTELU | 25 |
| 6.1 | Hammastuksen vaurioituminen sähkövirran takia | 25 |

| | | |
|-----|--|----|
| 6.2 | Vaurio ulkoisesta lähteestä..... | 25 |
| 6.3 | Pinnan väsyminen..... | 27 |
| 6.4 | Hampaan halkeaminen..... | 27 |
| 6.5 | Epänormaali kuluminen tuulivoimaloissa..... | 28 |
| 7 | TOIMENPITEET JA KUSTANNUKSET KÄYTTÖKELVOTTOMAKSI KULUNEILLE HAMPAILLE | 31 |
| 7.1 | Hammastuksen ennallistaminen siipilaakerin vaihdolla..... | 31 |
| 7.2 | Siipilaakereiden vaihtotyön korjauskustannukset | 33 |
| 7.3 | Tuotannonmenetykset..... | 34 |
| 8 | JOHTOPÄÄTÖKSET | 35 |
| 9 | POHDINTA..... | 37 |
| | LÄHTEET..... | 39 |

SANASTO

| | |
|--------------|---|
| hotspot | termi rakenteen kuormituskeskittymälle |
| napa | tuulivoiman kolmea siipeä yhdistävä komponentti |
| naselli | tuulivoimalan konehuone |
| pinioni | ensiöhammaspyörä |
| pitch | termi siivenkäännölle |
| siipi | tuulivoimalan lapa, puhekielessä siipi |
| siipilaakeri | laakeri siiven ja napavalun välissä, joka mahdollistaa siiven kääntämisen |
| yaw | termi konehuoneen kääntöjärjestelmälle |

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö sai herätteen tuulivoimaloiden siivenkääntömekanismien ongelmista. Työn tilaaja FCG NorthWind Consulting Oy on toistuvasti useissa eri voimalatyypeissä todennut lähes systemaattista ongelmaa, jossa avohammasvälityksen kautta ohjatun siiven hammastus on altis kulumiselle.

Tässä työssä vertaillaan siivenkääntöjärjestelmiä ja kuvaillaan niiden ominaisuuksia sekä tutkitaan sähköisen siivenkäännön hammasvälityksen vaurioilanteita. Työssä etsitään syitä siivenkäännön hammastuksen kulumiselle ja ratkaisuja vaurioiden ennalta ehkäisemiseksi.

2 TUULIVOIMALA

Tuulivoimalalla muutetaan tuulen liike-energiaa voimalan akselin pyörimisenergiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Tuuli pyörittää tuulivoimalan siipiä, jotka pyörittävät konehuoneen voimalinjaa. Voimalinjan ulostulon akseli pyörittää edelleen generaattoria, joka tuottaa sähköä. (1.)

Nykyaikaiset kaupalliset tuulivoimalat ovat vaaka-akselisia, kolmesiipisiä ja niiden roottori on torniin nähden tuulen yläpuolella. Tällainen voimala on yleisimmin käytetty tuulisähkön tuotannossa, sen ollessa taloudellisesti edullisin. Sillä on suuri pyyhkäisyypinta-ala, suurimmillaan lähes 2 hehtaaria. (1.)

Tuulivoimalan tuotto on suoraan verrannollinen siipien pyyhkäisyypinta-alaan. Roottorin pinta-ala suhteessa pyyhkäisyypinta-alaan on pieni 2–3 % eli suuren pinta-alan käyttöön tarvitaan minimaalinen määrä materiaalia. Sillä on erinomainen hyötysuhde verrattuna muihin ratkaisuihin, ja se on pitkäaikaisessa käytössä rakenteellisesti kevein ja luotettavin. (1.)

2.1 Konehuone

Tavanomaisesti tuulivoimalan konehuoneessa on konepeti, johon on asennettu voimansiirtolinja, joka sisältää päälaakerin, pääakselin sekä vaihteiston (1). Muut konehuoneen komponentit kuten generaattori, voimalan ohjausjärjestelmät sekä vaihtoehtoisesti muuntaja on asennettu konepetin ympärille apurungoin. Konehuoneen kuori valmistetaan lasikuidusta.

2.2 Napa

Tuulivoimalan siivet on laakeroitu suoraan kolmea siipeä yhdistävään napaan. Napa on muotoonsa valettua terästä (1). Useat voimalavalmistajat suosivat myös navan suojaamista lasikuituisella kuorella. Roottorin napa on yksi laitoksen raskaimmista komponenttikokonaisuudesta. Se välittää lapojen napaa pyörittävän momentin laitoksen voimalinjalle.

Napa sisältää seuraavat keskeisimmät pääkomponentit:

- napavalu

- siivenkäännön mekaaninen toteutus ohjausjärjestelmään
- siipilaakerit.

2.3 Siivet

Roottorin siivet valmistetaan yleisimmin komposiittimateriaaleista, joissa käytetään lasikuitua sekä joskus myös hiilikuitua tai puuta yhdessä epoksin tai polyesterin kanssa. Siivet toimivat myös laitoksen tehonsäätö- ja pysäytysmekanismina. Pisimmät Suomen tuulivoimaloiden siivistä vuonna 2019 olivat noin 75 metriä. (1.) Pohjoismaisiin olosuhteisiin siipiin laminoidaan usein myös lämmityselementtejä jään kertymisen estämiseksi.

2.4 Torni

Tornilla tuulivoimala pystytetään halutulle korkeudelle. Yksittäisen tuulipuiston sisällä voi olla teknisesti samoja tuulivoimaloita useilla eri pituuksilla olevilla torneilla tuuliolosuhteiden optimoimiseksi. Tuulivoimalan torni sekä eritoten uudet nykyaikaiset jopa 160 m korkeat tornit ovat alttiita oskilloinnille, ja näin ollen tornien sisään on usein asennettu massavaimentimia, käytännössä lisäpainoja, jotka itsessään sekoittavat tornin oskilloinnin taajuuksia haluttuun suuntaan.

2.5 Teräslohkotorni

Tavanomaisesti torni pystytetään useista teräslohkoista. Teräslohkot kiinnitetään toisiinsa pulttiliitoksilla. Kiinnityspultteja voi olla yhdellä liitostasolla toistasataa pulttien kiristysmomentin ollessa jopa kymmeniä tuhansia newtonmetrejä.

2.6 Hybrid-torni

Hybrid tarkoittaa sellaista tornia, jossa sen alkupää on rakennettu betonista ja tornin loppuosuus pystytetty tavanomaisilla terästornilohkoilla betoniosuuden jatkoksi. Suoraan paikan päälle rakennettavaa betoniosuutta käytetään yleisesti silloin kun voimalalta halutaan sellaisia ominaisuuksia, jotka muutoin vaatisivat normaalilta teräslohkotornilta ominaisuuksia, joita ei kustannussyistä rakenneta.

3 SIIVENKÄÄNTÖ TUULIVOIMALOISSA

Tuulivoimalan napaan laakeroidut siivet toimivat laitoksen tehonsäätö- ja pysäytysmekanismina (1). Siivet säätävät asentoaan tuulen mukaan parhaita tehollista tuottoa hakien. Tyypillisesti siivenkääntö on toteutettu joko sähköisesti tai hydraulisesti. Kummallekin mekaaniselle toteutukselle on omat etunsa.

Koska siivet ovat käytännössä ainoa tekijä, jolla voimala voidaan tarvittaessa pysäyttää, tulee siivenkääntöjärjestelmiin sisällyttää hätäjärjestelmä siipien ohjausta varten, mikäli laitoksessa ilmenee vikatilanne siipien normaaliin ohjausjärjestelmään.

3.1 Siivenkäännön ohjausjärjestelmät

Siivenkäännön ohjauksien ns. älykkyydelle on eroavaisuuksia eri valmistajilla. Yksinkertaistettuna voimala ajaa siipensä tiettyyn asentoon tietyllä tuulen keskiarvolla, kaiken muun toiminnallisuuden ollessa edellä mainitusta suoraa eroavaisuutta voimalavalmistajien kesken.

Pohjoismaiden jäätävissä olosuhteissa ohjauksen älykkyys on usein merkittävä tekijä. Siiven saadessa jäätä pintaansa, voi siipi menettää tehoaan huomattavasti ja tällöin ohjauksen tulisi osata reagoida aerodynaamisesti tehoaan menettäneeseen siipeen ja hyväksyä tilanne, jossa tietyllä tuulimäärällä ei välttämättä yllätäkään tiettyyn määritettyyn laskennalliseen tuottoon. Toisin sanoen järjestelmän ei tulisi seurata orjallisesti itseään vaan sen pitäisi osata toimia myös tarvittaessa opportunistisena parhaimman tehon suhteen.

Alla on luetteloituna pohjoismaissa käytössä olevien voimalatyyppien tyypillisimpiä ohjausjärjestelmien reagoititapoja jäätäviin olosuhteisiin:

- Voimala sammuttaa itsensä, kun laskettuun tuotantoon ei päästä ja käynnistyy aina uudelleen, ajaen siivet orjallisesti tiettyyn tuulesta riippuvaan asentoon niin kauan kunnes ohjelman laskema tuotanto tietyllä siipikulmalla saavutetaan.

- Voimala sammuttaa itsensä, kun laskettuun tuotantoon ei päästä, odottaen jonkin aikaa ja käynnistyy uudelleen. Mikäli uusintayrityksellä voimalan ei onnistu vielääkään päästä tuotannolle, se sammuu ja odottelee vielä aiempaa kauemmin siipien jään sulamisen toivossa.
- Voimala havaitsee, ettei se pääse laskennalliseen tehoon tietyllä siipikulmalla, tällöin ohjausjärjestelmät voi muuttaa siipien tehollista asentoa hieman ja kuvainnollisesti kokeilee päästääkö kyseisellä asennolla paremmalle tuotannolle.

3.2 Siivenkäännön mekaaninen toteutus hydraulikalla

Jokaiselle siivelle on oma hydraulisylinteri ohjausjärjestelmineen. Yksittäistä lapaa käännetään hydraulisella sylinterillä. Sylinteriputki on usein nivelöity napavaluun ja sylinterin varsi siipeen. (Kuva 1.) Tunnetusti hydraulisylinterien paineentuottojärjestelmä sekä öljytankki on sijoitettu konehuoneeseen ja hydraulikka johdetaan liukurenkaan avulla voimalinjan lävitse napaan, sylinterien ohjaukselle ja lopuksi itse sylintereihin.



KUVA 1. Hydraulinen siivenkääntö (2)

Hydraulisessa siivenkäännössä hätäjärjestelmä on toteutettu siten, että napaan on sijoitettu jokoista sylinteriä kohden paineakut, jotka mahdollisessa vikatilanteessa laukaistaan sylintereihin ajaen siivet normaaliasentoon, jolloin roottorin pyöriminen saadaan pysähtymään.

3.3 Hydraulisen siivenkäännön edut

Hydraulisessa toteutuksessa on vähemmän mekaanisesti kuluvia osia, käytännössä siis vain sylinterien tiivisteet sekä siivenkäännön liikettä välittävät nivelet. Lisäksi navassa ei tarvita niin sanottu ”isoa” sähköä, vaan ainoastaan ohjausvirtaa hydraulikalle. Tämä omalta osaltaan vähentää huomattavasti komponenttien määrää navassa. Myös siivenkääntöohjauksen hätäjärjestelmä voidaan säilyttää yksinkertaisena, jolloin siinä on ainoastaan paineakut ja niiden laukaisuventtiilit. Vähäisen komponenttimäärän myötä napavalun rakenne voidaan säilyttää rakenteellisesti puhtaana, tarkoittaen että napavalussa oleville rei'ille ja muille kuormituskeskittymiä (hotspot) aiheuttaville ulokkeille ei ole tarvetta.

3.4 Hydraulisen siivenkäännön haitat

Hydraulinen siivenkääntö tarvitsee paineistettua nestettä toimiakseen. Laitteiston ikääntyessä järjestelmiin voi syntyä vikatilanteita, jotka hydraulisessa toteutuksessa usein korreloituvat komponenteista vuotavaan hydraulikkaöljyyn ja pahimmassa tapauksessa vuotava komponentti ilmi-antaa itsensä vasta sitten kun laitteiston öljytankki havaitsee öljyntason olevan liian matala. Erään voimalatyyppin siivenkääntöjärjestelmän öljytilavuus on 260 litraa. Vuotava matalaviskositeettinen öljy tunkeutuu pyörivässä navassa jokaiseen paikkaan. Suurin riski on, että vuotanut öljy tunkeutuu siipilaakereihin muuttaen siipilaakereissa olevan voitelurasvan ominaisuuksia radikaalisti.

Myöskin hydraulinen kääntöjärjestelmä vaatii enemmän energiaa toimiakseen verrattuna täyssähköiseen siivenkääntöön. Järjestelmän täytyy jatkuvasti ylläpitää korkeaa painetta aktiivisesti asentoaan muuttavalle siivenkäännölle.

3.5 Siivenkäännön mekaaninen toteutus sähkökäytöllä

Sähköisessä toteutuksessa siipeä käännetään vaihteellisella sähkömoottorilla hammasvälityksen avulla. Sähkömoottori pyörittää pinionihammaspyörää, joka on kosketuksissa siipilaakerin hammasrustukseen. (Kuva 2.) Koko siipilaakerin sisäkehä on hammastettu, tarkoittaen että siipeä voisi käytännössä pyörittää jopa täyden kierroksen akselinsa ympäri, toisin kuin hydraulisessa käännössä, jossa sylintereiden oma mekaniikka tämän estää.



KUVA 2. Liebherr, Slewing drives for Wind turbines (3)

Tyypillisesti jokaiselle siivenkääntömoottorille on erikseen oma ohjausyksikkönsä, sähkömoottorin päävirransyöttö sekä hätäohjausjärjestelmä.

Sähköisessä siivenkäännössä hätäohjausjärjestelmä on toteutettu tähän suunnitellulla akustolla jokaista siivenohjausta varten. Mikäli vikatilanne järjestelmän omalle ohjaukselle tulee, tällöin hätäakusto aktivoituu ja ajaa akkuvirralla siivet takaisin normaaliasentoon, jolloin roottorin tehollinen pyöriminen lakkaa.

3.6 Sähkökäyttöisen siivenkäännön edut

Sähköinen siivenkääntö ei vaadi huomattavia määriä öljyä toimiakseen, ainoastaan voiteluna sähkömoottorien vaihdevälitykselle suhteellisen pienen määrän. Lisäksi sähköinen järjestelmä ei kulu hydrauliseen järjestelmään verrattuna niin paljon sähköenergiaa, koska sähköä kuluu vain silloin, kun siipeä liikutetaan. Sähköinen järjestelmä on myös jokseenkin halvempi tuottaa, useimmiten kaikki tarvittavat komponentit ovat standardisoituja ja yleisesti muuallakin kuin tuulivoimaloissa käytössä.

3.7 Sähkökäyttöisen siivenkäännön haitat

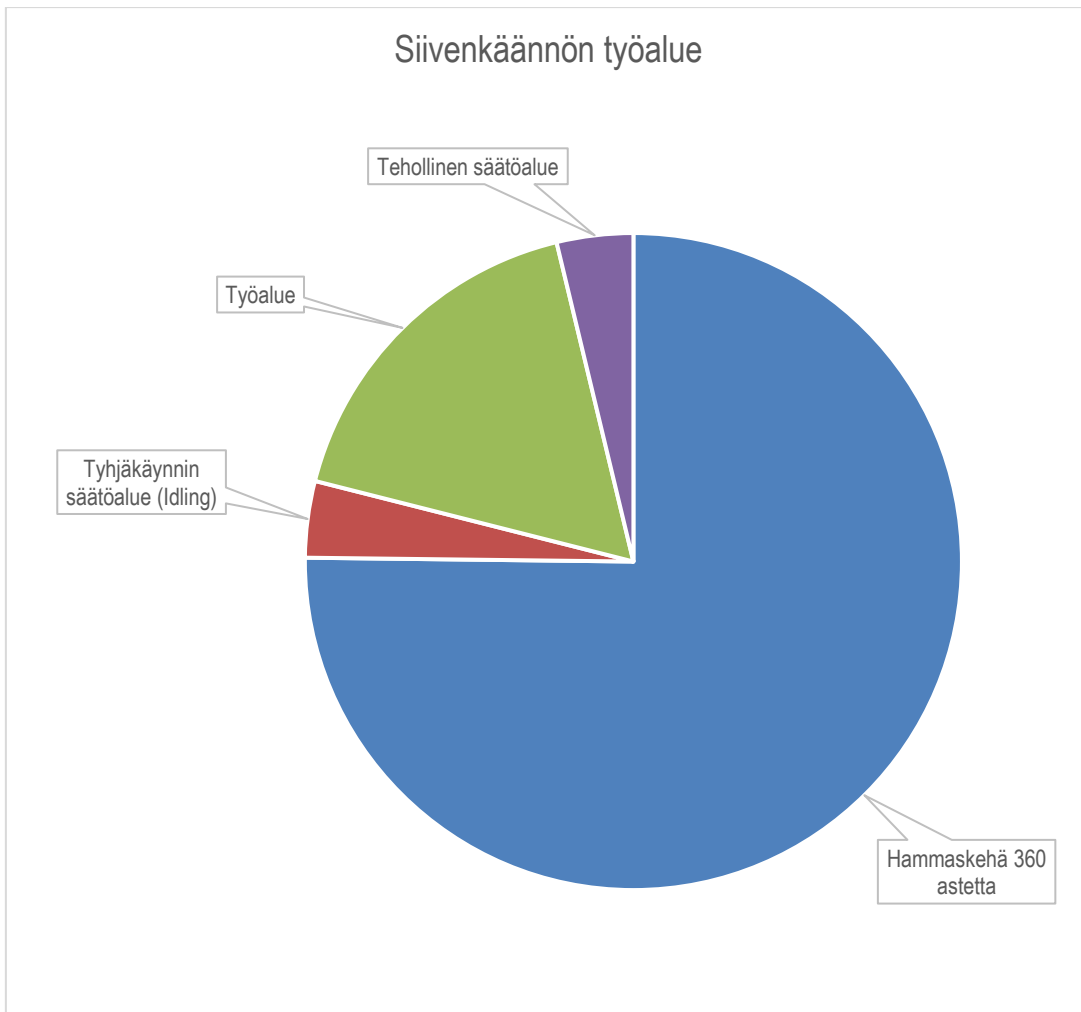
Toteutukseen vaaditaan huomattava määrä komponentteja. Eräissä voimalatyypissä jo pelkäs-tään yhtä siipeä kohden navassa voi olla jopa kolme erillistä sähkökaappia, jotka ovat täynnä lait-teiston kannalta kriittisiä komponentteja. Tässä tapauksessa kaksi kaappia täyttää järjestelmän oh-jaustarpeen ja kolmas kaappi sisältää akustot hätäohjausta varten. Nämä kaikki yhdessä luo suu-ren haasteen saada kaikki komponentit rakenteellisesti kiinnitettyä navan sisälle. Kiinnitykset eivät saa aiheuttaa napavalulle haitallisia kuormituskeskittymiä ja puolestaan kiinnityksien tulee kestää napavalussa tapahtuvia muodonmuutoksia vastaan.

Suuren komponenttimäärän lisäksi sähköisessä siivenkäännössä on myös paljon mekaanisesti keskeisiä osia:

- sähkömoottorin magneettinen kitkajarru, joka yksinomaan pitää siiven lukittuna sää-dettyyn asentoon
- sähkömoottorin erillinen alennusvaihte
- pinionipyörän ja siipilaakerin hammasvälitys.

3.8 Sähkökäyttöisen siivenkäännön työalue

Siivenkääntömoottoria seuraava hampaisto yksin ylläpitää siiven asentoa. Siivestä aiheutuvat tor-sionaaliset kuormat välittyvät suoraan avohammastuksen kautta jarrulliselle siivenkääntömootto-rille. Lisäksi hammastusta kuormitetaan suhteellisesti vain hyvin pieneltä koko siipilaakerin perus-ympyrän kiertävältä hammaskehän alueelta. Tyypillisesti työalue rajoittuu vain noin neljäsosan käy-tettävissä olevasta hammaskehästä. Tämä alue sisältää siiven tyhjäkäyntialueen sekä tehollisen säätöalueen, jossa siipi aktiivisesti hakee parhainta tehollista siipikulmaa. (Kuva 3.) Alue on myös suoraan verrannollinen hydrauliseen toteutukseen, jossa siipeä liikutetaan hydraulilla.



KUVA 3. Siivenkäännön työalue

4 RASVAVOITELU

Tuulivoimaloissa eniten käytetty voitelutyyppi on rasva. Voitelurasva koostuu kolmesta pääkomponentista, saentimesta, perusöljystä sekä muista valikoiduista lisäaineista. Alla on lueteltuna tyypillisimmät rasvalla voidellut kohteet:

- päälaakeri
- siipilaakerit
- siivenkäännön hammastus
- yaw-laakeri
- yaw-kääntöhammastus
- generaattorin laakerointi.

4.1 Saennin

Saentimia käytetään voitelurasvassa sidosaineena öljylle sekä muille lisä-aineistuksille. Saennin on ikään kuin lisäaineiden sekä öljyn annostelija voideltavalle alueelle. (4.) Saentimella voidaan myös vaikuttaa öljyn annostelun nopeuteen (erottuminen). Saentimella on suurin merkitys rasvan itse fysikaallisiin ominaisuuksiin, kuten esimerkiksi rasvan lämmönkestoon tai vedensietokykyyn.

4.2 Perusöljy

Rasvan voitelevuuden kannalta merkittävin aine on perusöljy. Öljynä voidaan käyttää synteettisiä tai mineraalipohjaisia öljyjä. Perusöljyn viskositeetilla yhdessä saentimen kanssa määritellään pitkälti rasvan haluttu juoksevuus. (4.)

4.3 Lisäaineet

Lisäaineilla voidaan seostaa rasvaa erilaisilla rasvan ominaisuuksia parantavilla aineilla, joko rasvaan liotettuina tai siihen voidaan lisätä jopa kiinteitä voiteluaineita kuten esimerkiksi molybdeenisulfidia (4). Siivenkäännön hammastusta voidellaan usein grafiitti seosteisella voitelurasvalla.

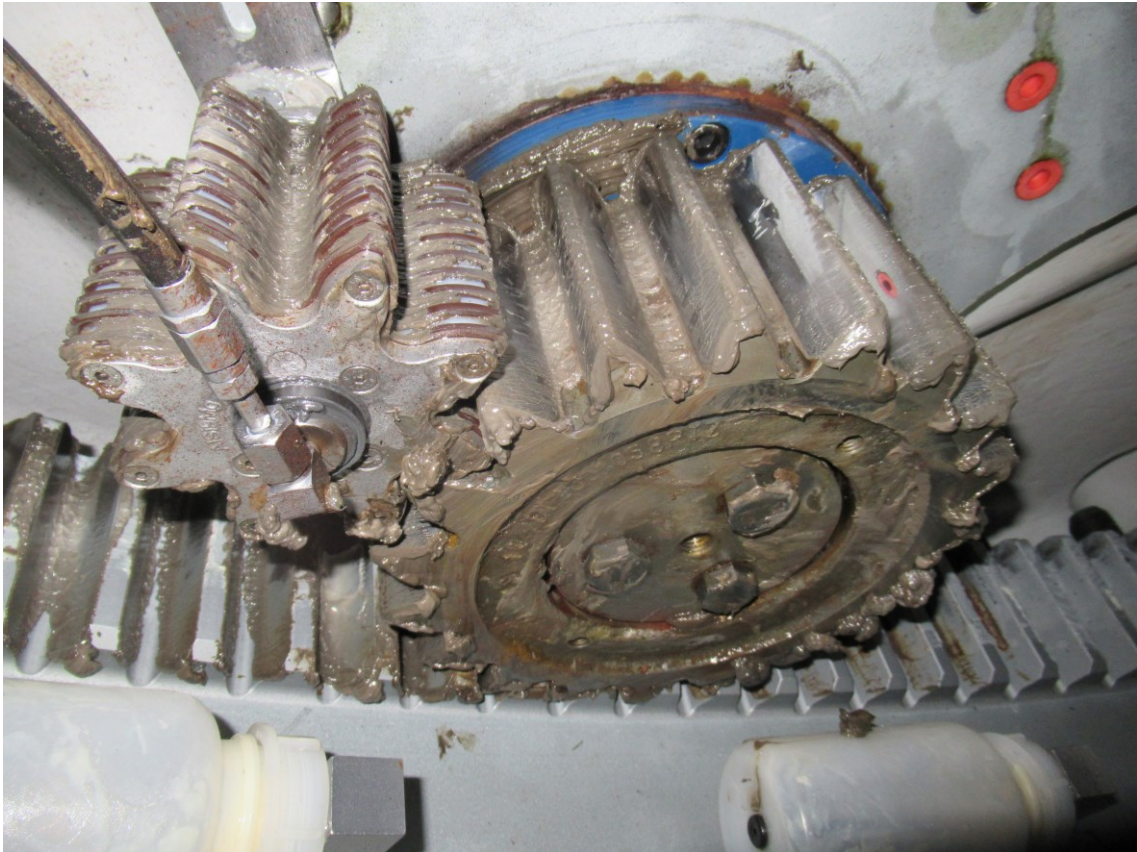
4.4 Avohammastuksen voitelu

Sähköisellä siivenkäännöllä toteutetuissa voimaloissa hammastusta voidellaan pääsääntöisesti rasvalla. Tyypillisinä eroavaisuuksina eri voimalavalmistajilla voitelun suhteen on käytettävä rasvatyyppi sekä tapa jolla rasvaa syötetään hammastukselle.

4.5 Automaattivoitelu

Useimmiten voitelu on automatisoitu. Voimalan ohjausjärjestelmät ohjaavat rasvan syöttöä kullekin toimilaitteelle harkitun määrän tietyn aikamääreen kuluessa. Joissain voimalatyypeissä on ominaisuuksia, joissa laitteistoja käytetään tarkoituksellisesti voitelu puutoksen ennaltaehkäisyyn. Tällöin voimala voi pysäyttää tuotantonsa ja esimerkiksi ajaa siipeä puoli kierrosta edes takaisin, jotta hammastus ja siipilaakerin voitelu saa vaihtuvuutta, mikäli muutoin laitteisto on ollut liian pitkään samassa asennossa.

Avohammastuksen voitelussa automaattivoitelujärjestelmä sisältää rasvatankin sisäänrakennetulla pumpulla, rasvan levittäjän sekä letkulinjaston pumpun ja levittäjän välille. Rasva saadaan kohteeseen hammastusta seuraavalla pinionipyörällä, joka vuotaa rasvaa lävitseen ajoitetusti sitä vasten olevalle hammasvälille. (Kuva 4.)



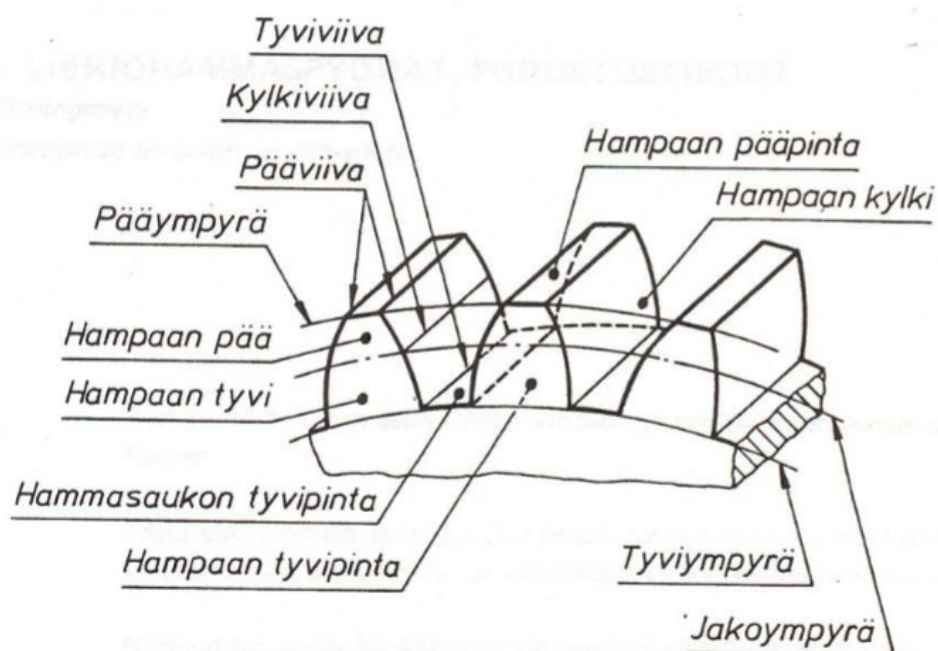
KUVA 4. Rasvan levittäjäpinioni vasemmalla välityksen pääpinionia vasten.

4.6 Rasvan syöttö seuraavalla levittäjäpinionilla.

Seuraava levittäjä syöttää rasvaa kohteelle vain silloin kun hammastus liikkuu ja rasvapinioni pyörii sen mukana. Sähköisessä siivenkäännössä käynnin aikainen tehollinen hampaiston työalue on pieni ja täten seuraavan rasvapinionin käyttö ei ole kriittisimmän alueen voitelun kannalta tehokkainta. Siiven "sahatessa" pieniä määriä käynnin aikana pitkään, ei työalue välttämättä saa uutta rasvaa lainkaan. Kyseinen kriittinen työalue saa rasvaa vasta silloin kun voimala pysäytetään ja käynnistetään uudelleen, jolloin siipi ajaa itseään työ ja tyhjäkäyntiasennon välillä hammasvälityksen liikuttaessa itseään laajemmalla alueella tai vaihtoehtoisesti mikäli voimalassa on ohjelmoituna erillinen rasva-ajo kuten selitettynä (7.1.1 Automaattivoitelu).

5 HAMMASPYÖRÄT

Hammaspyöriä käytetään tehon välittämiseen yhdeltä akselilta toiselle tai muuttamaan voima- ja nopeussuhdetta. Sovelluksissa käytetään erityyppisiä hammaspyöriä käyttötilanteiden mukaan. Tavanomaisimpia hammaspyörätyyppejä ovat suora- ja vinohampaiset lieriöhammaspyörät. Suorahampaiset hammaspyörät ovat hammaspyörätyypeistä rakenteeltaan kaikkein yksinkertaisimpia (kuva 5.) ja niitä käytetään sellaisissa kohteissa, joissa pyörimisnopeudet eivät ole korkeita ja melu ei ole ongelma. (5, s. 2.)



KUVA 5. Termistö (6, s. 13.)

5.1 Siivenkäännön hammastus

Tuulivoimalan siipilaakerin hammastus on suora sekä profiililtaan suorakylkinen, ryntökulman ollessa tyypillisesti 20 astetta. Pinionipyörän hampaiden profiili poikkeaa usein siipilaakerin hampaan geometriasta. Pinionipyörän hampaisiin täytyy koneistaa profiilin siirtoa, jotta suurihalkaisijaisen siipilaakerin ja suhteessa pienehkön pinionipyörän hammasparit kohtaavat virheettää.

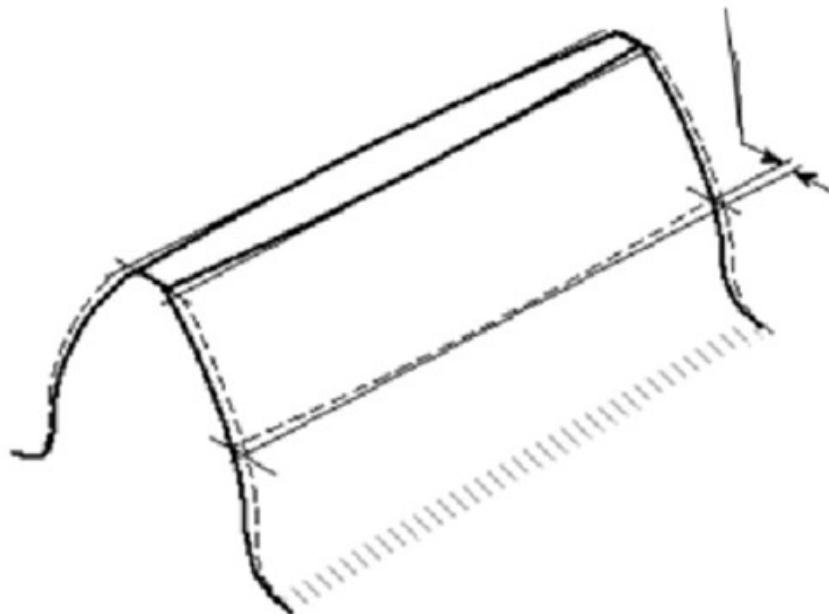
5.2 Komponenttitason muodonmuutokset sekä hammaskosketus

Siipien napaan aiheuttamat voimat luo muodonmuutoksia koko rakenteelle. Napavaluista pyritään suunnittelemaan mahdollisimman sulavalinjaisia, jotta voima muodonmuutoksineen ei kulkisi mitään muuta rakennetta äkillisesti jäykemmän taikka heikomman alueen lävitse. Alalla esimerkiksi tunnetaan tapauksia, jossa napavaluun on tehty kierrereikiä navan nostoteknisistä syistä ja kun nostotyö on saatu valmiiksi, on nämä reiät hiomalla muotoiltu sulavalinjaisiksi uudestaan.

Koska navassa tapahtuu jatkuvasti rakenteellisia muodonmuutoksia laitoksen ollessa tuotannolla, täytyy myös napaan asennettaville komponenteille antaa suunnittelussa erityistä huomiota.

Suunniteltaessa raskaasti kuormitettuja hammasvälityksiä, tulee huomioida navan muista muodonmuutoksista huolimatta myös komponenttitason kuormituksista aiheutuvat muodonmuutokset, jotka voivat epäedullisesti vaikuttaa esimerkiksi hammaskosketukseen. Tuulivoimaloissa tätä suunnitteluseikkaa voidaan todeta esimerkiksi siivenkäännön hammasvälityksessä, jossa siivenkäännön mekanismit ovat suuren vaihtelevan kuorman alla. Kääntömoottori voi olla sijoitettuna siten, että sen pinionihammaspyörä on ilman kuormitusta tarkoituksellisesti linjattu vinoon suhteessa siipilaakerin hammastukseen, tai pinionin hammaspofiili voi olla muotoiltu profiililtaan pitkittäissuunnassa kapenevaksi (kuva 6), jolloin hammaskosketus kuormittamattomana on vain osittaista. Kuorman vallitessa sekä siitä aiheutuvien muodonmuutosten kasvaessa pinionin hammastus oikenee suhteessa siipilaakerin hammastukseen ja hammaskosketus laajenee kummankin hampaan osalta täydelle pinta-alalle koko profiililtaan.

Longitudinal Crowning Amount



KUVA 6. Hammas muotoiltu kapenevaksi (7)

Alla kuva 7 on erään voimalatyyppin siivenkääntöhammastuksen työalueelta. Edellä mainittu kuormituksesta aiheutuva oikeneminen voidaan todeta konkreettisesti tarkastelemalla hampaiden kiillottumia. Kuvan oikealta laidalta seurattaessa hampaiden kiillottumia vasempaan päin, nähdään selvästi millä alueella hammastusta kuormitus on korkeimmillaan, jolloin hammaskosketus tasaantuu koko hampaan pinta-alaan.



KUVA 7. Tuulivoimalan siivenkäännön hampaiston työalue

5.3 Hammastuksen karkaisu

Tuulivoimaloiden hammaskehät karkaistaan hampaiden kovuuden ja kulumiskestävyyden lisäämiseksi. Suurille hammaskehille menetelmänä käytetään induktiokarkaisua. Menetelmässä hammaskehä skannataan magneettikentän aiheuttamalla lämmöllä, jota seuraa skannauksen mukana kulkeva välitön päästösuihkutus vedellä. Skannauksen aloitus- ja lopetuskohta aiheuttaa materiaaliin myös karkaisemattoman alueen. Hammaskehän karkaisematon alue pyritään suunnittelussa sijoittelemaan siten, ettei aluetta kuormiteta. Karkaisematon alue merkataan yleensä maalimerkillä suoraan hammaskehälle.

Induktiokarkaisun tavoitteena on karkaista vain hampaan pintakerros, jättäen hampaan ytimen metallurginen rakenne ennalleen. Tällöin hampaan pinta on erittäin kova ja kulumiskestävä, hampaan ytimen ollessa joustava ja muodonmuutoksia salliva.

6 KULUMISTILANTEIDEN TARKASTELU

Hammastus kuluu käytössä ja kulumisen seurauksena hampaiden pinnan huippukohtat mataloituvat. Pinnan pienten huippukohtien kulumisen parantaa hampaan kestävyyttä pistekuorman vähentyessä tiettyyn rajaan asti. Kulumisen kiihtyy puutteellisen voitelun alla, likaisissa olosuhteissa, epäedullisessa hammaskosketuksessa sekä ylikuormitettaessa. Kulumisen kiihtyy radikaalisti, mikäli hampaan profiili muuttuu kulumisen myötä, jolloin todennäköisesti myös pinnan karkaistu kovin osuus on jo ylitetty.

6.1 Hammastuksen vaurioituminen sähkövirran takia

Hammastus voi vaurioitua sähkövirran takia. Tuulivoimaloissa salaman isku laitteistoihin on yleinen ongelma. Usein salama maadoittuu voimalan siiven kautta laitteistojen lävitse voimalan perustaan. Voimaloissa on järjestelmiä, joilla estetään ulkoisten sähkövirtojen maadoittuminen sille herkkien toimilaitteiden kautta. Mikäli sähkövirta jostain syystä pääsee kulkemaan riittävän suurena hammastuksen kautta, on tuloksena vaurio hammastukseen. Hammaskosketuksen välinen sähköinen resistanssi hitsaa hampaiden huippukohtia ja voi saada hampaan pinnalle muodonmuutoksia. Myös lämpötilan nousu paikallisesti voi muuttaa hampaan metallurgisia ominaisuuksia.

6.2 Vaurio ulkoisesta lähteestä

Yleinen hampaan pinnan vaurioitumisen syy on hampaista kulumisen seurauksena irtoavan metallin tai muun ulkoisen materiaalin siirtyminen hampaasta toiseen. Hammaskosketuksen välissä oleva partikkeli kaivautuu hampaan pinnankarheuden huippukohtien väliseen laaksoon tarttuen pintaan kiinni. Tarttunut ja jos usein työkarkaistunut partikkeli luo epäjatkuvuuden hampaan pintaan kasvattaen tuon alueen paikallista kuormitusta, voiden aiheuttaa uusia vaurioita kuten esimerkiksi väsymissäröjä (5.9 Pinnan väsyminen) ja mahdollisesti irrottaen pinnasta lisää kulumispartikkeleita, vyöryttäen ongelmaa yhä eteenpäin. (8.)

Tuulivoimaloissa voi esiintyä vikatilanteita, joissa esimerkiksi muista laitteistoista on irronnut komponentteja, jotka ovat vaaraksi muille toimilaitteille. Hammastuksen väliin joutuessaan esimerkiksi irtomainen kiinnityspultti voi aiheuttaa pahojakin vaurioita.

Alla kuva 8 siiven teräksisistä tasapainotuskuulista, jotka ovat päässeet voimalan konehuoneeseen ja Yaw-hammastuksen väliin. Kuulat ovat luoneet hampaan pinnalle painaumia ja niin edelleen sisäisiä jännityshuippuja, jotka voivat olla jatkossa alttiita aiheuttamaan muita vaurioitilanteita. (5.6 Pinnan väsyminen)



KUVA 8. Kuulat ovat aiheuttaneet painaumia hampaan pintaan

Alla kuva 9 on navan ohjauskaapin oviluukusta, joka vikatilanteesta johtuen on irronnut ja ajautunut siivenkäännön hampaiston välitse. Hampaisto itse ei kärsinyt vaurioita.



KUVA 9. Ohjauskaapin luukku ajautuneena hampaiston lävitse

6.3 Pinnan väsyminen

Paikalliset korkeat jännitystilat voivat aiheuttaa hampaan pintakerrokseen väsymissäröjä. Pinnalla paljas särö tai pinnan sisäinen särö toistuvassa jännityskuormassa puolestaan voi aiheuttaa materiaalin irtoamisen hampaasta. Pinnan väsyminen ei vaadi hankaavaa kulutusta, ja täten ilmiö tunnetaan myös vierintälaakereissa. (8.)

6.4 Hampaan halkeaminen

Hampaaseen voi muodostua halkeama, mikäli hampaan taivutusjännityksen kesto ylittyy. Myös hammastuksen lämpökäsittelyn aikana materiaaliin sisään on voinut syntyä paikallisia jännityksiä, jotka aiheuttavat itsessään tai yhdessä hampaan ulkoisen jännityksen alla särön. Hammas voi haljeta kokonaan irti, mikäli särö heikentää hampaan kuorituskestoa. (8.)

6.5 Epänormaali kuluminen tuulivoimaloissa

Hammastus kuuluu tyypillisesti sen kuormitetuimmalta työalueelta. Kuluminen tuulivoimaloiden siivenkäännön välityksissä on nähtävissä yleensä voimakkaimmillaan kahden hampaan osalta, joiden välillä välitys säätää asentoaan eniten. Kuluminen myös kiihtyy entisestään, jos hampaan pinta kuluu karkaisuasteen ylitse. Siipilaakerin hammastus on induktiokarkaistu ja täten karkaisun kovin osuus kattaa pinnan syvyydestä vain joitain millimetrejä.

Kuvassa 10 on pahoin kulunut hammas. Hampaan profiili on muuttunut huomattavasti ja kuluminen on edennyt pintakarkaisun kovimman osuuden lävitse. Hampaan päältä voidaan erottaa myös induktiokarkaisun aiheuttamat värimuutokset metalliin. Kyseinen voimala on ollut operatiivisessa käytössä kuvanottohetkellä noin kuusi vuotta, sen lasketun elinkaaren ollessa 20 vuotta.



KUVA 10. Pahoin kulunut hammas. Hampaan päältä voidaan erottaa myös induktiokarkaisun aiheuttamat värimuutokset metalliin.

Kuvassa 11 on kuvan 10 hammas kuvattuna alapuolelta. Kuluminen on jättänyt hampaaseen olakkeen, josta voidaan päätellä, että pinionipyörä ja siipilaakeri eivät ole vertikaalisesti linjassa. Pinionipyörä menee hammastuksen ylitse sen yläpuolelta ja jättää hammastuksen alaosan pinta-alasta pienen osuuden käyttämättä. Olake aiheuttamaa vääristyneitä kuormia hammastukseen. Olake voi estää pinionipyörän liukumisen hammastuksen pinnalla muodonmuutoksien aikana ja ikään kuin kammata itseään olakkeen kautta. Kuluminen on todennäköisesti hitaampaa hammastuksen olakkeen puolella ja puolestaan kiihtynyt hampaan ylälaidassa.



KUVA 11. Epätasainen kuluminen on muovannut hammastukseen olakkeen

Viimeisenä kuvassa 12 on hammastus kulunut voimakkaasti kiillottumalla. Hammas on menettänyt profiilinsa, sen kylki on kulunut noin yhden millimetrin kuormituksen suuntaan. Hampaan ympärillä on nähtävissä voitelurasvaa, joka on kerännyt itseensä huomattavasti hammastuksen metallisia kulumispartikkeleja. Partikkelipitoinen rasva kiihdyttää kulumista ja on osakseen aiheuttanut hampaan kiillottumisen. Kiillottuman muodosta voidaan todeta, että hammaskosketus on täydellinen, tasaantuen koko pinta-alaan kuorman alla.



KUVA 12. Voimakkaasti kiillottunut hammas

7 TOIMENPITEET JA KUSTANNUKSET KÄYTTÖKELVOTTOMAKSI KULUNEILLE HAMPAILLE

7.1 Hammastuksen ennallistaminen siipilaakerin vaihdolla

Hammastuksen korjaus uuden veroiseksi tarkoittaa käytännössä koko hammastetun siipilaakerin vaihtamista uuteen. Tuulivoimalan siipilaakerin vaihto edellyttää vaativia nostotöitä suurilla nostureilla. Nykyaikaisen tuulivoimalan napakorkeus vaihtelee 100–160 metrissä, joka tarkoittaa, että myös nosturin on kyettävä operoimaan samalla tasolla.

Siipilaakereita on tunnetusti vaihdettu kahdella tavalla. Siipilaakerit vaihdetaan maan tasolla (Vaihtoehto 1) tai napakorkeudessa roottorin ollessa konehuoneeseen kiinnitettynä (Vaihtoehto 2) Kumpikin vaihtoehto esitetään alapuolella sekä kunkin vaihtoehdon alle on kerätty laatikoittain työmenetelmien etu- ja haittapuolia:

1. Roottori lasketaan kokonaisuudessaan alas. Siivet irrotetaan maassa. Siipilaakerit vaihdetaan. Siivet asennetaan takaisin ja roottori nostetaan kokonaisuudessaan takaisin ylös. (Kuva 13.)

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">+ Vaativia korkeanpaikan nostoja käytännössä vain roottorin irti-otto ja uudelleen asennus+ Suurin osa nostoista ja asennustöistä tehdään maan tasalla+ Maassa tehtävät työt voidaan tehdä löyhemmillä tuulirajoituksilla+ Kustannustehokkain. Nostotyöt kokonaisuudessaan jopa yhden vuorokauden aikana - Vaatii paljon tilaa nostokentältä- Kokonaisen roottorin nostaminen vaatii suuren nostokapasiteetin nosturin |
|---|



KUVA 13. Roottori lasketaan kokonaisuudessaan alas. Tuulivoimalan ympäristö on avara.

2. Yksittäinen siipi irrotetaan vaaka-asennossa ja varastoidaan nostokentälle. Kaksisiipinen roottori käännetään ilman siipeä oleva puoli osoittaen ylös. Siipilaakeri vaihdetaan. Roottori käännetään siivetön osuus jälleen vaaka-asentoon ja siipi nostetaan uudelleen paikalleen.

- + Ei vaadi nostokentältä huomattavasti tilaa.
- + Ei vaadi korkean nostokapasiteetin nosturia, massojen ollessa suhteellisen pieniä
- Nostotyöt vaativia, kaikki nostot suoritetaan korkeanpaikan työnä.
- Kaikki asennustyöt suoritetaan korkeanpaikan työnä
- Tuulirajoitukset nostotöille rajoitetuimpia
- Voimalinjaa täytyy mekaanisesti pyörittää roottorin kääntämiseksi kaksisiipisenä
- Ei kustannustehokkain. Yhden siipilaakerin vaihto kokonaisuudessaan vuorokauden aikana
- Jotkin voimalatyypeistä on tuulen aiheuttaman kuorman vuoksi rakenteellisesti epävakaita roottorin ollessa lukittuna kaksisiipisenä

7.2 Siipilaakereiden vaihtotyön korjauskustannukset

Seuraavaksi esitetään taulukossa 1 siipilaakereiden vaihtotyön kulujen pääpiirteet arvioituna, jossa menetelmänä kokonainen roottori lasketaan alas ja siipilaakerit vaihdetaan maassa yhteen voimalaan. Nosturin mobilisointikulut voidaan jakaa voimaloiden kesken, jos vaihtotyö suoritetaan useampaan voimalaan. Työmaan sisällä tehdyt siirrot laskutetaan usein omalla hinnalla. Kulut esitetään tyhjänä työn julkisessa versiossa, varsinaisten hintojen ollessa saatavilla liitteessä 1.

Taulukko 1. Siipilaakereiden vaihtotyö (Liite 1)

Siipilaakereiden vaihtotyö

| Tapahtuma | Määrä | Hinta-arvio |
|--|-----------|-------------|
| Siipilaakereiden hinta. | 3kpl | xx |
| Nosturin mob-demobilointikulut (600t pääkone ja 70t apukone) | | xx |
| Nostureiden työhinta €/pv | 3pv arvio | xx |
| Siipilaakereiden vaihtotyö €/pv (6 asentajaa) | 3pv x 10h | xx |
| Odotusaika, sääriski €/pv (Nosturit ja asennustiimi) | 1pv | xx |

| | |
|-----------------|--------------------|
| Yhteensä | Hinta-arvio |
|-----------------|--------------------|

xx

7.3 Tuotannonmenetys

Korjaustöiden aikana voimala ei tuota sähköä. Tuotannonmenetykset ovat merkittävä tekijä korjaustöitä suunniteltaessa. Tuotannonmenetyksen rahallinen osuus määräytyy tuuliolosuhteista, sähkön markkinahinnasta sekä voimalan tehollisesta tuottokapasiteetista.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Pahoin kulunut hammas voi haljeta kokonaan irti tai ääritapauksessa hammaskosketus voi mennä jumiin välityksen ollessa kaksoisrynnöllä, jolloin alkavan rynnön kohtaavat hampaat menevät päällekkäin. Näissä tapauksissa seurauksena voi olla odotettavissa laajaa tuhoa koko laitekokonaisuuteen. Kulunut hammastus voi myös vääristää siiven säätökulmaa ja näin ollen vaikuttaa voimalan tuotantoon.

Yksiselitteistä syytä siivenkäännön hampaiden kulumiselle ei ole. Kulumiseen liittyy useita eri tekijöitä, joista osa on selitettävissä laiminlyödyllä huollolla, asennusvirheellä tai muun rinnakkaisen vikatilanteen aiheuttamana.

Voimalan omistajan tulisi varmistaa, että voimaloita huoltava taho kiinnittää erityistä huomiota siivenkäännön hammastuksen huoltotoimenpiteisiin sekä tarkastaa laitteiston kuntoa ja toiminnallisuutta säännöllisesti koko elinkaaren ajan.

Alle on listattuna todennäköisimpiä riskitekijöitä, joihin voimaloita huoltavan tahon tulisi kiinnittää huomiota ennenaikaisen kulumisen ehkäisemiseksi tai muiden vaurioitilanteiden välttämiseksi.

Rasvan syöttö

Rasvaa on oltava hammastuksen työalueella jatkuvasti. Syötön tulisi olla niin suurta, että aiempi jo käytetty partikkelipitoinen rasva siirtyy uuden rasvan tieltä pois, puhdistuen hampaan pintaan. (9.) Automaattirasvareita käytettäessä siivenkäännölle tulisi olla oma määräjaksottainen erillinen rasva-ajo, mikäli muussa tilanteessa voimala ei aja siivenkäännön työaluettaan lävitse. Lisäksi on huomioitava, että käytettävä rasva soveltuu paikallisiin olosuhteisiin, jolloin esimerkiksi kylmä ilma voisi rajoittaa rasvan virtausta.

Hammasvällys

Hammasvällystä laadittaessa vällyksen määrässä tulisi kompensoida välityksen rakenteelliset muodonmuutokset. Välityksen valmistajan tehdasarvot voivat olla laadittu rakenteelle, jossa muodonmuutokset ovat yksinkertaistettuja tai niitä ei ole huomioitu lainkaan.

Hammaskosketuksen linjaus

Kohtaavat hammastukset tulee olla vertikaalisesti linjassa. Siten että materiaaliltaan kovempi hammaspari peittää vastassaan olevan hammastuksen täysimääräisesti.

Hammaskosketus

Hammaskosketus on säädettävä siten että kosketuksen kuvio on täydellinen siivenkään-
nön työalueen kuormitetuimmalla alueella. Mikäli kuvio säädetään vastoin oletuksia kuor-
mittamattomalla alueella, on tällöin tuloksena vääranlainen kuvio kuormitetulla alueella.

Ulkoiset riskit.

On varmistuttava, että navassa ei ole mitään irtonaista materiaalia, joka voisi päätyä ham-
mastuksen väliin aiheuttaen vaurioitilanteita.

9 POHDINTA

Työssä vertailtiin alan tyypillisimpiä siivenkääntöjärjestelmien toteutuksia sekä tutkittiin niihin liittyviä ongelmatilanteita korostaen avohammasvälitteisen siivenkäännön hampaiden kulumista. Aineistoa tuulivoimaloiden ongelmatilanteisiin ei ole yleisesti saatavilla. Työssä käsiteltyjen vaurioanalyysien tukemisessa käytettiin aineistoja muilta teollisuuden aloilta rinnastaen niitä tuulivoimatekniikkaan.

Hammasvälityksen kulumisongelman vaikeutta kuvastaa se, että alan vastauksena ongelmaan uusimmissa voimalatyypeissä on tehty ylimääräinen asennusreikä siipeä pyörittävälle moottorille. Ylimääräinen asennusreikä mahdollistaa kääntömoottorin sijoittamisen uudelleen, mikäli aiempi sektori on kulunut pilalle, jolloin käytettävissä on jälleen uusi kulumaton hammassektori

Ongelma on huolestuttava nimenomaan vanhemmissa voimalatyypeissä, joissa edellä mainittua ylimääräistä kääntömoottorin asennusreikää ei ole olemassa ja hammastuksen tulisi kestää koko voimalan elinkaaren ajan. Joissain tapauksissa hammastus voi olla jo huomattavan kulunut. Ongelman tulisi saada suurempaa huomiota tuulivoima-alan keskuudessa, jotta kulumiseen ehditään reagoimaan ajoissa.

Voimalavalmistajan tulisi laatia raja-arvot hammastuksen kulumiselle, jotta voimalan omistaja voisi ennakoiden estää laajempia vaurioita ja mittavia tuotannon menetyksiä.

Aiheita jatkotutkimuksille

- Luoko napavalun käynnin aikaiset muodonmuutokset hankausta muutoin paikallaan rynnössä olevien hampaiden välillä.
- Kuluneen hampaan pintakovuus verrattuna ehjän pintakarkaistun hampaan kovuuteen, mistä kulumisasteesta alkaen hampaan kuluminen alkaa kiihtyä entisestään.
- Onko siipilaakerin käyntivälilyksillä vaikutusta hammaskosketukseen

Myös hammastuksen ennallistamiselle on olemassa vaihtoehtoisia korjaustapoja, joiden käytännön toimivuutta tuulivoimaloihin tulisi selvittää enemmän.

- Markkinoilla on olemassa niin kutsuttuja ”hammas-inserttejä”, joilla voisi korvata kuluneen hampaan uudella. Onko työ mahdollista tehdä tuulivoimalassa ja onko ”hammas-insertillä” edellytyksiä kestää käynnin aikaisia kuormituksia.
- Voisiko kuluneen hampaan täyttää hitsaamalla ja koneistaa hampaan profiili uuden veroiseksi tuulivoimaloissa.

Oma arvio työstä

Opinnäytetyö onnistui hyvin. Kokemuksellani tuulivoima-alalla oli merkittävä rooli työn laadinnassa. Esimerkkitalanteiden havainnollistaminen työhön oli mielekästä, koska olin niitä itse aikoinaan voimaloissa toteamassa. Suurimpana haasteena oli saada olemassa oleva tietotaitoni yhdistettyä opinnäytetyön muodollisiin raameihin ja pysyen silti aihealueen piirissä. Kokonaisuutena työ nostatti omaa kehittymistäni nimenomaan projektimaisessa tiedon raportoinnissa.

Toivon työni herättävän ajatuksia tuulivoima-alalla. Tähän mennessä siivenkäännön kuluneisuus ei ole saanut mielestäni tarvittavaa huomiota. Tuulivoimalat Suomessa ovat keskimäärin elinkaarensa alussa ja kyseiseen ongelmaan on vielä mahdollista vastata.

LÄHTEET

1. Tuulivoimayhdistys 2021. Tuulivoimaloiden rakenne. Hakupäivä 3.11.2021. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimaloiden-rakenne>.
2. Zipp, Kathie 2011. WindPower Engineering & Development. Cylinders for hydraulic pitch adjustment. Hakupäivä 20.12.2021. <https://www.windpowerengineering.com/cylinders-for-hydraulic-pitch-adjustment/>.
3. Liebherr 2021. Slewing drives for wind turbines. Hakupäivä 20.12.2021. <https://www.liebherr.com/shared/media/components/documents/getriebe/liebherr-slewing-drives-for-wind-turbines-product-brochure-en-web.pdf>.
4. Teboil 2021. Rasvavoitelun perusasioita. Hakupäivä 31.1.2022. <https://www.teboil.fi/tuotteet/voiteluaineet/yleista-voiteluaineista/rasvavoitelun-perusasioita/>.
5. Leivo, Eero 2013. Hammasvaihteen vierintäpoikkeaman mittaaminen ja analysointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. Hakupäivä 16.5.2022. <https://trepo.tuni.fi/handle/123456789/21616>.
6. SFS 3535 kumottu 1976. Hammaspyörät. Käsitteet määritelmien. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. Hakupäivä. <https://online.sfs.fi/fi/index/hakutulos.html.stx>. Vaatii käyttöoikeuden.
7. Fatourehchi, Ehsan & Mohammadpour, Mahdi & King, Paul D. & Rahnejat, Homer & Trimmer, Gareth & Williams, Alan. 2018 Microgeometrical tooth profile modification influencing efficiency of planetary hub gears. International Journal of Powertrains, 7 (1-3). pp. 162- 179. ISSN 1742-4267. University of Central Lancashire. Hakupäivä 20.4.2022. <http://clock.uclan.ac.uk/32113/>.
8. Errichello, Bob & Muller, Jane 2022. Machinery Lubrication. How to analyze gear failures. Hakupäivä 16.5.2022. <https://www.machinerylubrication.com/Read/29202/using-sight-glasses>.

9. Opetushallitus 2021. Voiteluaineet: Perusteet. Hakupäivä 1.2.2022. http://www03.edu.fi/oppi-materiaalit/kunnossapito/mekaniikka_e01_voiteluaineet_perusteet.html.

