

Tero Junkkari

TUULIMYLLYJEN GENERAATTORIEN LAAKEROINNIN SÄHKÖISET VAURIOT

Opinnäytetyö
Ympäristö- ja energiatekniikka

2018



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Tero Junkkari	Insinööri (AMK)	Helmikuu 2018
Opinnäytetyön nimi		
Tuulimyllyjen generaattorien laakeroinnin sähköiset vauriot		42 sivua
Toimeksiantaja		
Suomen Voima Oy		
Ohjaaja		
Marko Saxell, Lehtori		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyö tehtiin Haminan Mäkelänkankaan tuulivoimapuiston omistajan, Suomen Voima Oy:n tehtävänannosta. Työn tarkoituksena oli tutkia generaattorilaakerien toistuvien vaurioitumisien juurisyy, sekä sen pohjalta parantavat toimenpiteet joilla laakerien kestoikää saadaan paremmaksi.</p>		
<p>Työn teoriaosuudessa on käsitelty vuotovirtailmiötä sekä sen mahdollisia syntymekanismia. Värähtelydataa on kerätty vuodesta 2012, minkä perusteella laakerien vaurioitumisen eteneminen on saatu hyvin ennustettavaksi kyseisillä generaattoreilla. Työssä käytetyt mittalaitteet ja ohjelmat on esitelty teoriaosuudessa.</p>		
<p>Työn analysointiosuus perustuu tehtyihin mittauksiin, joissa otettiin huomioon kyseiselle generaattorityypille havaitut vaurion etenemisen muodot. Tehtyjen analysointien ja havaintojen perusteella suositeltiin siirtymistä hybridilaakereiden, eli keraamisilla kuulilla varustettujen laakereiden käyttöön. Työn alussa generaattoreihin oli asennettu sisäkehältään eristetyt laakerit, joiden kestoikä vaihteli 3–4 vuotta. Kokeilussa oli myös kokonaan eristämätön laakeri, jonka kestoikä oli ainoastaan 4 kuukautta.</p>		
<p>Tehtyjen havaintojen ja värähtelyanalysointien perusteella voidaan suositella tuulimyllyjen generaattorien laakerointeihin käytettäväksi ainoastaan hybridilaakereita, jotta saavutetaan haluttu kestoikä. Hybridilaakerit ovat sähkönkulun kannalta paras ratkaisu laakerivirtaongelmiin niiden eristävyys takia, koska metalli–metalli–kontaktia ei pääse syntymään. Hybridilaakerin kalliimpi ostohinta saadaan kustannusten puolelta katettua, jo yhdenkin laakerin vaihdon kustannuksilla. Hybridilaakerien menekin takia niiden hinta on pudonnut jo lähes eristetyn laakerin kustannustasolle, joten edes uusioasennuksissa ei kannata enää käyttää tavallisia, tai kehältään eristettyjä laakereita.</p>		
Asiasanat		
Tuulimyllyn generaattori, laakerivirrat, hybridilaakeri		

Author (authors)	Degree	Time
Tero Junkkari	Bachelor of Engineering	February 2018
Thesis title		
Leakage current damages in bearings of wind turbine generators		42 pages
Commissioned by		
Suomen Voima Oy		
Supervisor		
Marko Saxell, Senior Lecturer		
Abstract		
<p>The thesis was commissioned by Suomen Voima, who is the owner of the Mäkelänkangas windfarm in Hamina. The aim of the thesis was to investigate the root cause of the repeated damages of generator bearings, and based on that, to make improvements so that the bearings would last longer.</p>		
<p>The theoretical part of the thesis covers the leakage current and its formation mechanism. Vibration data has been collected since 2012, and therefore the damages of the generator bearings are well predicted. The measurements and programs used have been presented in the theoretical part.</p>		
<p>The analysis part of the work is based on the measurements, which were considered what kind of damage progress might be in these kinds of generators. Based on analyzes and observations, the recommendation is to use ceramic ball bearings in the future. At the beginning of the thesis, the bearings what was used is insulated from inner ring and the life of the bearing was about 3-4 years. The experiment was also the bearing without insulation, and the bearing life was only 4 months.</p>		
<p>Based on the vibration analyzes and findings, the thesis conclusion is to use only the hybrid ball bearings on the wind turbine generators. Hybrid bearings are the best solution when leakage current appears. Hybrid bearings cost is about twice time expensive than normal insulated bearing, but the coast of that is been paying back after one replacement.</p>		
Keywords		
wind turbine, current leakage, hybrid bearing		

ALKUSANAT

Kiitokset kotiväelle tuesta ja ymmärryksestä, ja varsinkin vaimolleni Marjalle, hänen patistelustaan lopputyöni valmiiksi saattamisessa.

Ummeljoella, helmikuussa 2018

Tero Junkkari

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TAVOITE.....	9
3	TUTKIMUSKYSYMYKSIÄ.....	10
4	MENETELMÄN VALINTA	12
5	TUULIVOIMATUOTANTOA SUOMESSA	15
5.1	Tuulivoimatuotannon kehitys.....	15
5.2	Tuulivoimaloiden käytettävyys.....	17
6	TUOTANTOKUSTANNUSVERTAILU.....	19
7	KUNNOSSAPITOAJATUS	20
8	VUOTOVIRTAILMIÖ	20
9	SÄHKÖVIRRRAN LÄPIKULUN AIHEUTTAMAT VAURIOT	23
10	TYÖNKULKU JA HAVAINNOT	24
10.1	Ensimmäiset laakerin vaihdot.....	27
10.2	Eristämättömän laakerin kestoikä.....	31
10.3	Vuotovirtamittaus rullamitalla	33
10.4	On line -kaapeloinnin korjaus	35
11	RATKAISU VUOTOVIRTAONGELMIIN	36
12	JATKOTUTKIMUS	39
	LÄHTEET	40

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

AC	Vaihtovirta (Alternating current)
BPFI	Laakerin sisäkehän ohitustaajuus (Ball pass frequency of inner race)
BPFO	Laakerin ulkokehän ohitustaajuus (Ball pass frequency of outer race)
CBM	Kuntoon perustuva kunnossapito (Condition-based maintenance)
DC	Tasavirta (Direct current)
D-end	Generaattorin käyttöpää (Generator drive-end)
EDM	Kipinätyöstö (Electrical discharge machining)
FTF	Laakerin pitimen ohitustaajuus (Fundamental train frequency)
FFT	Nopea fourier muunnos, jonka avulla muodostetaan aikatasosignaalin spektri (Fast fourier transfer)
gE	Värähtelyn kiihtyvyyden huippuarvo verhoikäryspektrissä (Envelope filtered time domain signal)
n	Akselin pyörimistaajuus (Shaft passing frequency)
Nde	Generaattorin vapaapää (Generator nondrive-end)
RMS	Mitatun suureen neliöllinen keskiarvo eli tehollisarvo (Root mean square)
RTF	Kone huolletaan vikaantumisen jälkeen (Run to failure)

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön kohde on Haminan Mäkelänkankaan tuulipuisto (kuva 1). Puistossa generaattorilaakerien vaurioitumiset ovat aiheuttaneet useita tuotannon alenemiseen johtavia korjauksia. Dataa on kerätty jo vuodesta 2012 alkaen liittyen havaittuun ongelmaan, eli **sähkönkulun aiheuttamaan vaurioon generaattorien laakereissa**. Vaurioituminen on tapahtunut havaitussa tapauksessa paljon nopeammin kuin on odotettavissa, laakerin normaaliin kestoikään verrattuna. Vuotovirta pääsee kulkeutumaan generaattorin laakerien kautta, ja maadoittuu helpointa reittiä generaattorin runkoon. Maadoitusreitti kulkee laakerien sisäkehän ja siitä kuulien sekä ulkokehän kautta runkoon, aiheuttaen laakerien vaurioitumisen. Vaurion juurisyy varmentui, kun ensimmäiset vaihdetut laakerit purettiin ja todettiin selkeä sähkönkulun aiheuttama vauriomekanismi.



Kuva 1. Mäkelänkankaan tuuli- ja aurinkovoimalapuisto (Porvoon Energia 2016.)

Tuulivoimaloiden elinikä odotuksena on yli 20 vuotta, joten myös generaattorin laakerointien on suunniteltu kestävän saman ajan. Laakerointeihin kohdistuu virtarasitusta, mikä lyhentää laakereiden kestoikää varsin merkittävästi, mekaanisten rasitusten lisäksi.

Työssä tarkastellaan pääasiassa värähtelymittausten perusteella tehtyjä havaintoja. Mukana on tosin yksi varsin maanläheinen vuotovirtamittaus, joka esitellään raportissa. Jos laakerin vikaantuminen menee liian pitkälle, voi seurata myös täydellinen tuho (kuva 2).

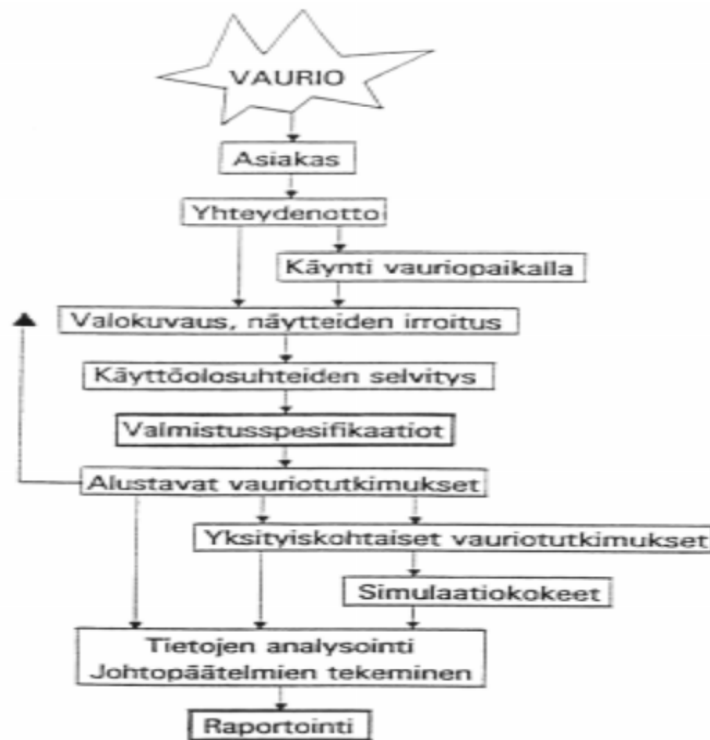


Kuva 2. Palanut tuulimylly Hamina 6.1.2017.

Teollisuudessa vuotovirta mielletään useasti sähköiseksi ongelmaksi ja ainoastaan sähkömoottorien tai generaattorin ongelmaksi. Teollisuudessa tapaukset tulevat esille ensin sähkömoottorissa ja generaattoreissa, joissa vikaantuminen on pyritty estämään sähkön vuotovirtareittejä muuttamalla. Käytössä on erilaisia akselin maadoitusrenkaita ja harjoja, joilla pyritään estämään vuotovirtojen kulku laakerien läpi. Tämä muutos voi mahdollistaa tilanteen, missä vuotovirta pääsee kulkeutumaan esim. pumpun tai vaihteen laakerointiin ja vaurioittaa sen. Opinnäytetyön kuvat ovat tekijän ottamia, ellei niissä ole erikseen viitettä.

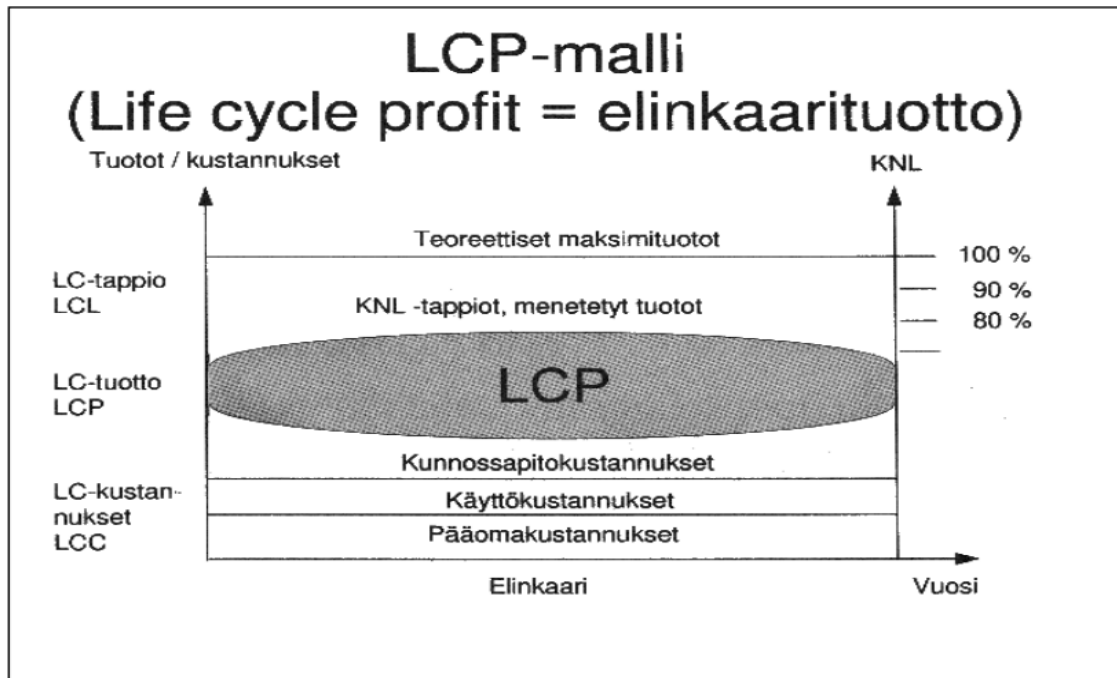
2 TAVOITE

Opinnäytetyön tavoitteena, on saada toimiva konstruktio tuulivoimaloiden generaattoreiden laakerointiratkaisuiksi. Opinnäytetyöni keskittyy vaurioanalyysin (kuva 3) tekemiseen, välille vaurio - raportointi. Opinnäytetyön valmis tuotos on prognoosin lopputulos, raportti vaurioanalyysistä.



Kuva 3. Toimintakaavio vaurioanalyysin suorittamiselle (Parikka & Lehtonen 2000.)

Opinnäytetyön lopullinen tavoite on tarjota toimiva ratkaisu tuulimyllyjen generaattoreiden laakerointeihin. Vuodesta 2012 asti toimineilla myllyjen generaattoreilla on tehty laakerien vaihtoja huomattavasti useammin kuin mitä laakerin normaali kestoikä on laskennallisesti. Tässä tapauksessa laakereiden kestoikä on ollut alle 30 % siitä, mitä laakerin valmistajat lupaavat spekseissään. Myös laskennallinen elinkaartuotto (kuva 4) jää liian alhaiseksi, jolloin oikealla laakeroinnin valinnalla on myös varsin suuri taloudellinen merkitys.

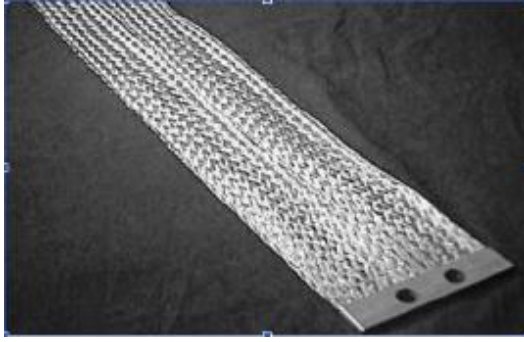


Kuva 4. LCP- malli (Riikonen 1996.)

3 TUTKIMUSKYSYMYS

Varsinainen tutkimuskysymys on, ”*kuinka saada generaattoreiden laakerit kestäväksi niille asetetun kesto-iän?*” Tuulimyllyissä on monta pyörivää, laakeroitua osaa, mutta tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia ainoastaan generaattorin laakerointia.

Toinen tutkittava kohde, laakerityypin vaihtamisen lisäksi, on maadoituksen parantaminen generaattorin rungon ja maadoituskiskon välillä. Maadoituskytkennässä tulisi tutkimusten mukaan käyttää 50-100 mm leveää kuparipunosta (kuva 5) generaattorin rungon ja maadoituskiskon välillä. Leveä kuparipunos tuottaa suurtaajuiselle virralle matalaimpedanssisemmän virtatien verrattuna pyöreällä maadoituskaapelilla tehtyyn kytkentään (ABB 2000; Rockwell Automation 2002, 45).



Kuva 5. Leveä kuparipunoskaapeli suurtaajuisen virran maadoitukseen (ABB 2000.)

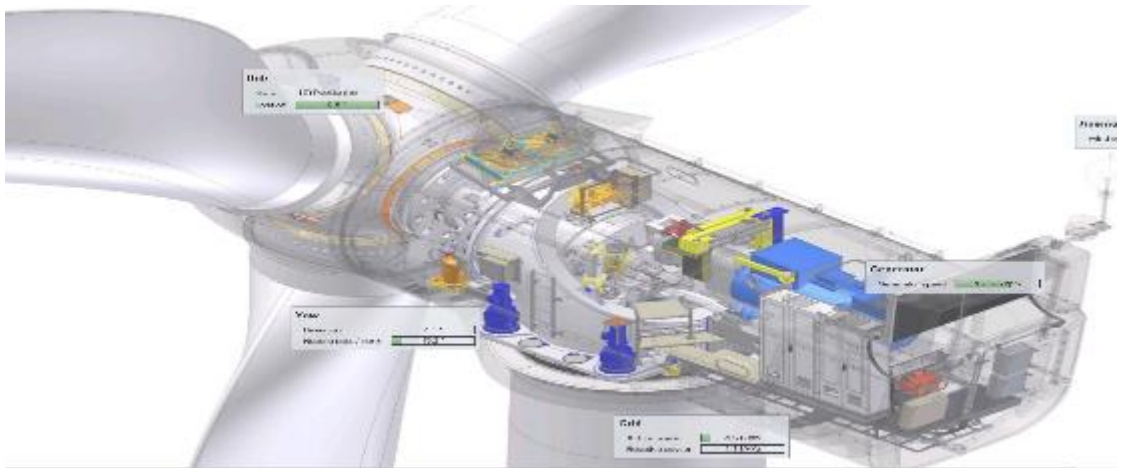
Generaattorien maadoituksessa on kuitenkin käytetty pyöreää kaapelointia (kuva 6), jonka vaihtamisesta lattakaapeliin on keskusteltu valmistajan (kuva 7,8) kanssa. Tosin ainakaan vielä kaapelointia ei ole vaihdettu.



Kuva 6. Generaattorin maadoitus tehty pyöreällä 16mm² kaapelilla.



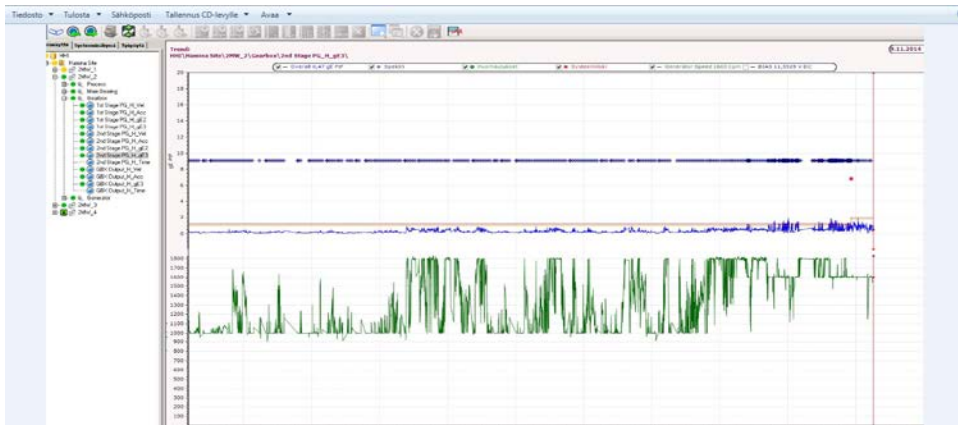
Kuva 7. Generaattori, malli Hyundai (Scada 2015.)



Kuva 8. Konehuone, malli Hyundai (Scada 2015)

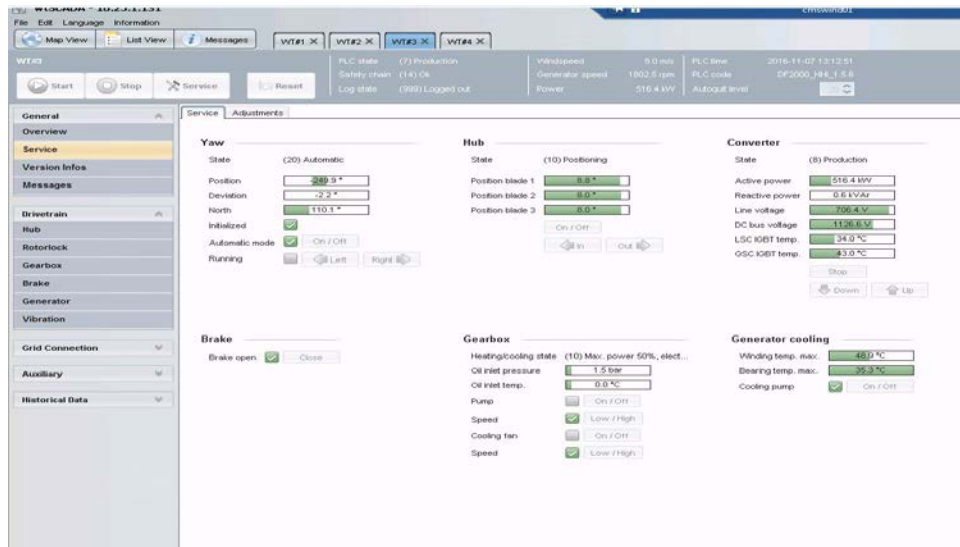
4 MENETELMÄN VALINTA

Tiedonkeruu on tapahtunut suurimmilta osin SKF- @bserver on line -ohjelmalla (kuva 9), josta dataa analysoidaan värähtelyjen osalta.



Kuva 9. SKF @bserver on line, rpm/värähtelydata. Sininen, värähtelyn voimakkuus Envelope Peak-to-Peak arvona. Vihreä, generaattorin rpm välillä 1000-1800 rpm (SKF Observer 2015.)

Muun taltioidun datan osalta tuulenopeuden ja suunnan, sekä tehotietojen analysointi tapahtuu Scadan avulla. Vaihteen ja generaattorin lämpötilojen sekä virtausten seuranta tehdään samoin Scadan avulla (kuva 10).



Kuva 10. Scadan mittausrvoja: Yawin ja Hubin asentotieto, Converterin sähköiset mittaukset, Jarru auki (siiven), Vaihteen ja generaattorin lämpötiloja (Scada 2015.)

Osa datasta on myös mitattu paikan päällä kannettavalla mittalaitteella, jotka osaltaan tukevat on line -mittauksia. Menetelmä perustuu näin ollen tiedonkeruuseen ja analysointiin. Värähtelydatan seulonta tapahtuu monella eri tavalla, joita voidaan hyödyntää signaalin analysoinnissa.

Yksi tärkein elementti on verrata generaattorin rpm-tietoa värähtelyn voimakkuuteen (mm/s). Peak-vue™-arvoa puolestaan käytetään lyhytkestoisten, korkeataajuuksien ilmiöiden, kuten laakerin ohitustaajuuksien analysointimenetelmänä. Tasasuunnattu PeakVue-aikatasosignaali koostuu alkuperäisestä aikatasosignaalista suodatetuista huippuarvoista (Reeves 1999).

Envelope™ on puolestaan SKF @btitude Observer -ohjelman käyttämä lähes vastaava aikatasosignaalin suodatusmenetelmä, korkeiden taajuuksien ”purskemaista” ilmiöitä analysoitaessa (kuva 11).

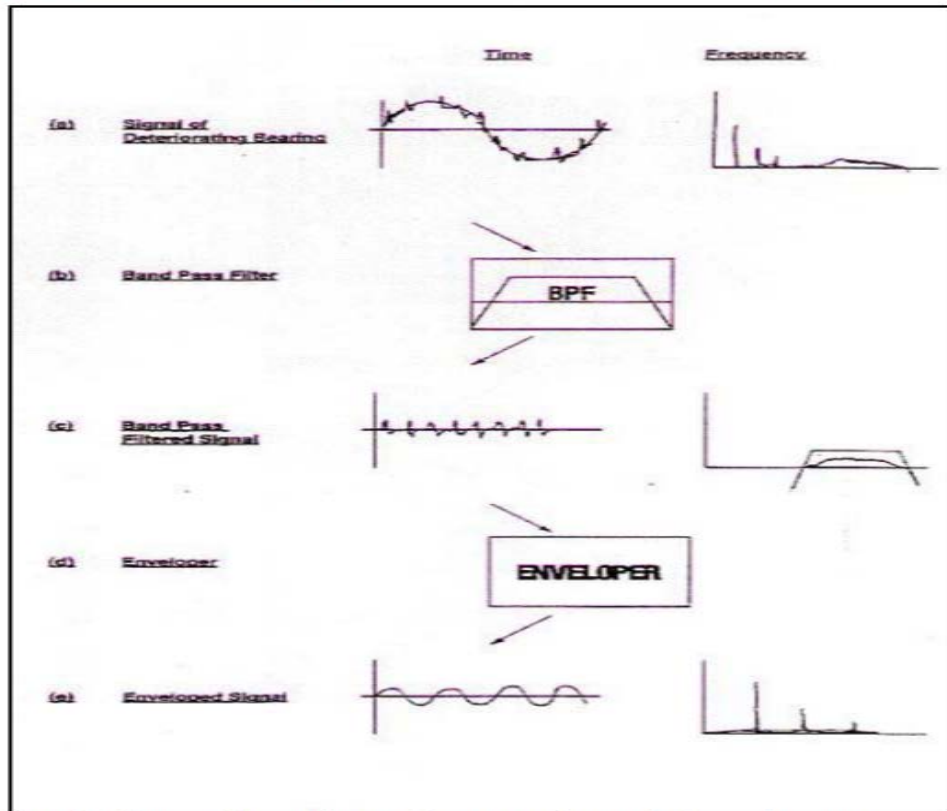


Figure 6. An illustration of the steps taken to envelope a time waveform signal to determine deteriorating components in the system such as bearings or gears.

Kuva 11. Envelope-suodatus aikatasosignaalin kantoaallossa olevista korkeataajuisista "purskemaisista" ilmiöistä (SKF @btitude Xchange, 2015.)

Paikan päällä tehtävät mittaukset tehtiin CSI 2140 (Emerson) analysaattorilla (kuva 12), ja analysoinneissa käytettiin Peak-vue™-analyysia.



Kuva 12. CSI 2140 analysaattori (Emerson 2015.)

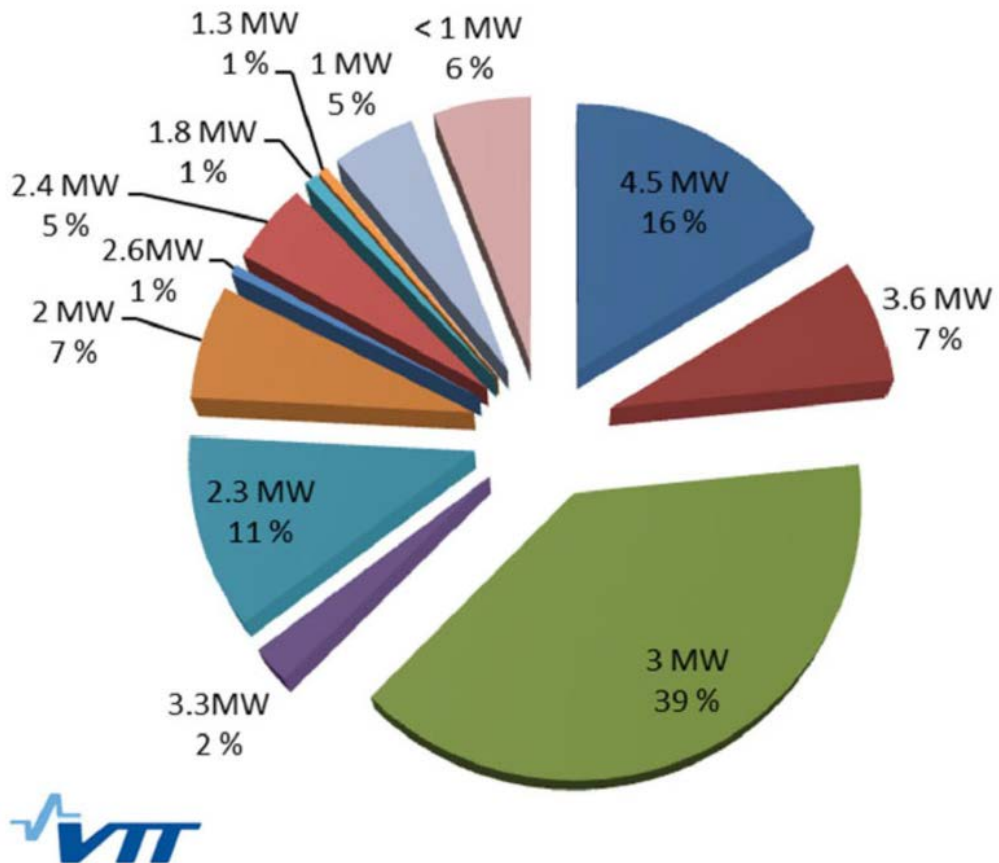
5 TUULIVOIMATUOTANTOA SUOMESSA

Tuulivoimakapasiteetin kehitys Suomessa on viimeisen vuosikymmenen aikana ollut varsin vaatimatonta, jos sitä verrataan muualla maailmalla tapahtuvaan kehitykseen. Uuden tuulivoiman rakentaminen on hyvässä vauhdissa, joten vuoden 2016 aikana on rikottu kansallisia tuulivoiman rakennus- ja tuotantotilastoja. Trendi näyttää, että kehitys jatkuu Suomessa myönteisenä myös lähivuosina. (Tuulivoimayhdistys 2016.)

Tutkittavana kohteena oleva Haminan Mäkelänkankaan tuulipuisto valmistui vuonna 2012. Puistossa on neljä Hyundai Heavy Industries -yhtiön valmistamaa 2 MW turbiinia, joiden teho on yhteensä 8 MW ja vuotuinen energiantuotanto on n. 20 GWh. Napakorkeus, jossa turbiini ja konehuone sijaitsevat, on sadassa metrissä. Roottorin halkaisija on 93 m, joten pyyhkäisypinta-ala on n. 6 793 m² ja siiven kärjen kehänopeus on luokkaa 75 m/s = 270 km/h myllyllä ollessa huipputuotannolla. (Hyundai Heavy Industries 2012.)

5.1 Tuulivoimatuotannon kehitys

Tuulivoimakapasiteetin kasvu oli varsin hidasta vuosiin 2012 ja 2013 saakka. Mutta vuonna 2013 rakentaminen kiihtyi ennätystasolle, joten vuosien 2012-2013 aikana Suomen tuulivoimakapasiteetti kasvoi peräti 56 prosenttia, ja keskiteho oli n. 2,1 MW (kuva 13). Vuosien aikana valmistui uusia voimaloita lähes viisikymmentä, sellaisille paikkakunnille kuin: Honkajoki, Lappeenranta, Pori, Raahe ja Simo.



Kuva 13. Vuonna 2013 Suomen tuulivoimaloiden keskiteho oli n. 2.1 MW (VTT 2013.)

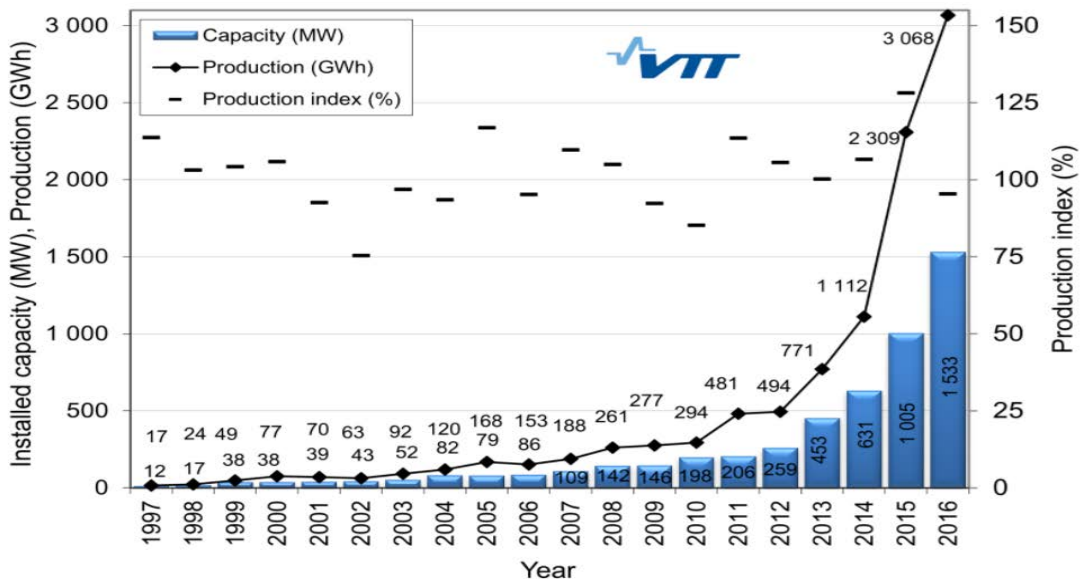
Vuoden 2013 kapasiteetti oli 448 MW, joka saatiin 211 tuulivoimalan tuotannosta. Tuulivoimaloiden sähkön yhteistuotantokapasiteetti oli 771 GWh, jolla saatiin n. 0,9 % maamme sähkönkulutuksesta.

Suomessa vuoden 2014 lopussa oli 260 tuulivoimalaa, joiden yhteenlasketuna kapasiteettina oli 627 MW. Tuulisähkön tuotanto vuonna 2014 oli yli miljardi kWh (1,1 TWh), joka oli n. 1,3 % kokonaissähkönkulutuksesta. Tuulienergiatuotanto kasvoi lähes 43 prosenttia edelliseen vuoteen verrattuna. Tuulivoimalla tuotettu sähkö vastasi yli 500 000 kerrostalokaksion vuotuista sähkönkulutusta.

Vuonna 2015 Suomeen rakennettiin 124 uutta voimalaa, yhteiskapasiteettiaan n. 379 MW. Vuoden aikana rakennettu voimalaitosten määrä, kasvatti Suomen tuulivoimakapasiteetin 1005 MW:iin ja 387 tuulivoimalaan. Tuuliener-

gialla tuotettiin 2,3 TWh sähköä vuoden 2015 aikana, jolla katettiin 2,8 prosenttia Suomen kokonaissähkönkulutuksesta. Tuotantokapasiteetti kasvoi peräti 110 prosenttia verrattuna vuoteen 2014.

Vuonna 2016 Suomeen rakennettiin 182 uutta voimalaa, yhteiskapasiteetiltaan n. 570 MW. Vuoden 2016 lopussa (kuva 14) Suomessa oli 552 tuulivoimalaa, joiden yhteiskapasiteetti oli 1553 MW. Tuulienergiatuotanto vuoden 2016 aikana oli 3,1 TWh, joka oli 3,6 % koko Suomen sähkönkulutuksesta. Tuulienergiatuotanto kasvoi noin kolmannekselle vuoteen 2015 verrattuna.



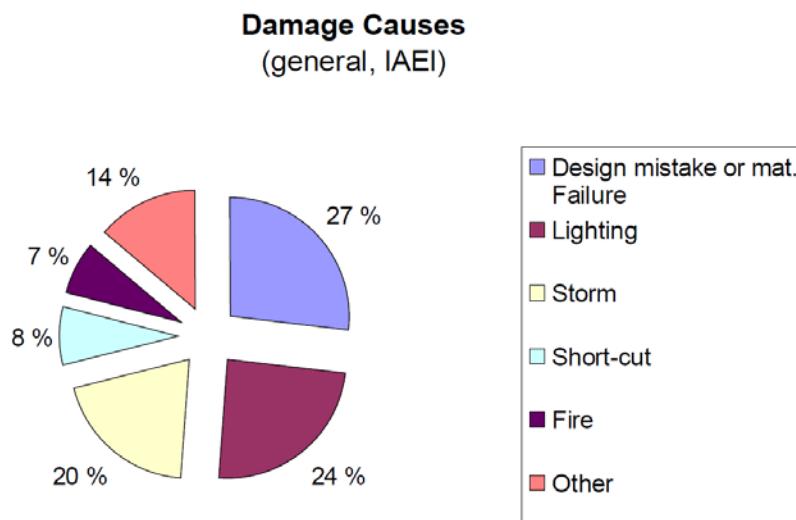
Kuva 14. Suomen tuulivoimakapasiteetin ja tuulisähköntuotannon kehitys vuodesta 1997 vuoteen 2016 loppuun (VTT 2016.)

Suomen Tuulivoimayhdistyksen (STY) mukaan huhtikuun 2017 alkuun mennessä oli 11 300 MW edestä julkaistuja hankkeita, joista merelle tehtävien hankkeiden osuus 1400 MW. Asennetun tuulivoimakapasiteetin keskiteho on nyt noin 3 MW, ja napakorkeus on kasvanut 100 metristä jopa lähes 150 metriin. (Suomen tuulivoimayhdistys vuosijulkaisu 2016.)

5.2 Tuulivoimaloiden käytettävyys

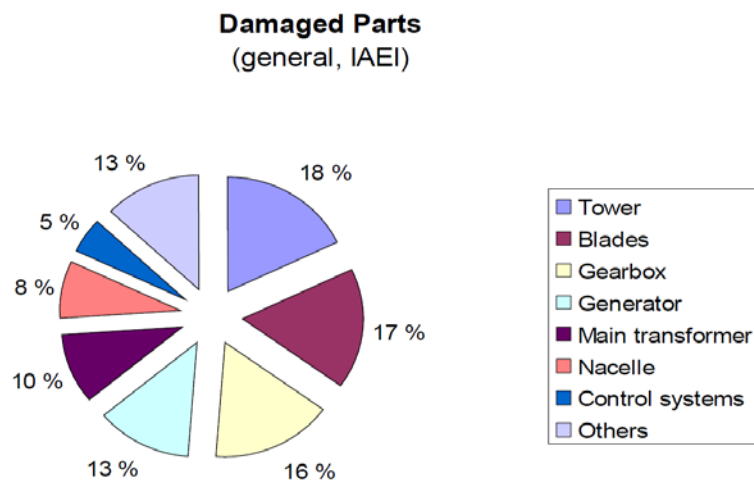
Yleisin toimivuuden mittari on: ”Kuinka monta tuntia voimala on tuottanut sähköä, huomioiden tuuliolosuhteet”. Hyvänä tasona pidetään 95–98 % tasoa, jolla laskennallisesti voimala voi olla tuotannolla.

Tuotannon taso riippuu siis suurimmilta osin huoltojen, ja mahdollisten vikojen aiheuttamasta ”epäkäytettävyydestä” (kuva 15), ja niistä johtuvista tuotannon alenemisista.



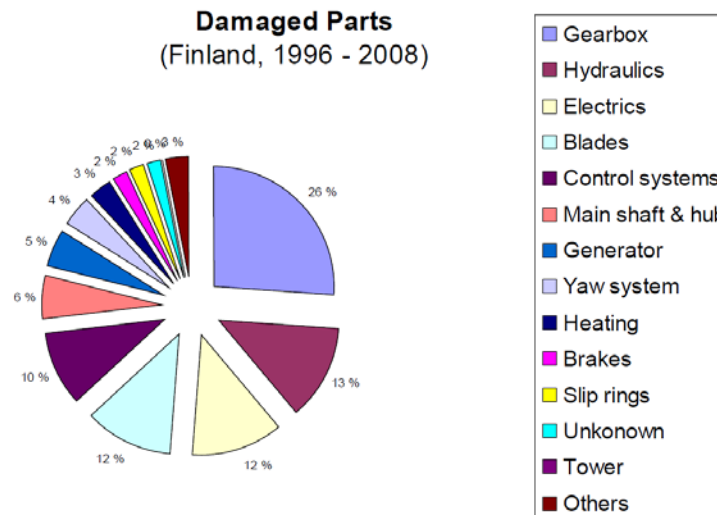
Kuva 15. Vikaantumissyöt yleisellä tasolla, kansainvälisesti (IAEI tutkimus 2008.)

Kansainvälisesti tarkasteltuna yleisimmät vikaantumisen kohteet ovat siivet, sekä tornin ja vaihteen osat (kuva 16).



Kuva 16. Vikaantuvat osat, kansainvälisellä tasolla (IAEI tutkimus 2008.)

Suomessa vuosien 1996-2008 välisenä aikana tehtyjen kirjausten mukaan suurin osa häiriöistä johtui (kuva 17) vaihteiston, hydrauliiikan sekä elektronii-kan vikaantumisista. (IAEI tutkimusjulkaisu 1996-2008.)



Kuva 17. Vikaantuvat osat, Suomi 1996-2008 (Gurvits 2008.)

Erilainen vikaantumistaso johtunee Suomessa olevien tuulimyllyjen pienemmästä lukumäärästä ja myös kehittyneemmästä rakennusvalvonnasta, jolloin tornien perustusten tekemistä valvottaneen paremmin kuin yleensä maailmalla. Tornien kaatumisia ei Suomessa ole kirjattuina vaurioina yhtään.

Voimaloita valvotaan etäkäyttönä niin tuotannon kuin värähtelyidenkin osalta. Tutkimuskohteena olevan Haminan Mäkelänkankaan tuulipuistoa valvotaan Empowerin Porvoon keskusvalvomosta tuotannon osalta. Etävalvontaohjelmalla käytetään **Scadaa (Supervisory Control And Data Acquisition)**. Värähtelyvalvonta toteutetaan **SKF @ptitude Observer 10.1.3** -kunnonvalvontaohjelmalla. Observerin helppokäyttöinen käyttöliittymä ja älykkäät diagnostiikkatoiminnot tarjoavat kaikentasoisille käyttäjille tehokkaat ja helposti muokattavat työkalut tehokkaiden online-seurantaohjelmien käyttöön.

6 TUOTANTOKUSTANNUSVERTAILU

Taulukossa 1 on Suomen energiantuotantokustannukset vertailtuna annuiteetimenetelmänä, jossa on laskettu investointikustannukset huipunkäytön aikana vuotuiselle pääomakustannukselle tasasuuruusina erinä laitoksen taloudelliselle eliniälle.

Laskelma on tehty huipunkäyttöaikana, jolla tarkoitetaan sellaista laskennallista tuntimäärää, jolloin voimalaitos voi toimia täydellä teholla ja tuottaakseen todellisen vuosituotantonsa suuruisen määrän energiaa. (Tekniikka ja talous 9/2017)

Aurinkovoimala	10 MW pv-voimala, 982 h/a	99,6 €/MWh
Turve	150 MW turvelauhdevoimala	76,2 €/MWh
Puu	150 MW puulauhdevoimala	75,9 €/MWh
Hiili	500 MW kivihiihlauhdevoimala	75,7 €/MWh
Merituuli	50 MW voimala, 3875 h/a	68,9 €/MWh
Maakaasu	850 MW kombilauhdevoimala	68,9 €/MWh
Ydinvoima	1650 MW voimala (uusi)	55,4 €/MWh
Ydinvoima	1650 MW (vanhalle paikalle)	42,3 €/MWh
Maatuuli	50 MW puisto, 2860 h/a	41,4 e/MWh

Taulukko 1. Suomen energiantuotantokustannukset vertailtuna annuiteettimenetelmänä. (Tekniikka ja talous 9/2017)

Porin Tahkoluotoon valmistui merituulipuisto, joka otettiin käyttöön 3. heinäkuuta 2017. Puistossa on kymmenen 4,2 MW tehoista Siemensin valmistamaa tuulimyllyä joiden yhteisteho on 42 MW, joka vastaa n. 8600 sähkölämmitteisen omakotitalon vuotuista sähkötarvetta. Vertailuna pelkästään Saksan rannikolla olevaan 4 400 MW tuotantoon, on Suomen merituulivoimatuotanto vielä varsin pientä. (Tekniikka ja talous 2017, 12-13.)

7 KUNNOSSAPITOAJATUS

Kunnossapitotoiminnan keskeisimpinä päälajeina pidetään yleisesti huoltoa, ehkäisevää kunnossapitoa sekä korjaavaa ja parantavaa kunnossapitoa. Nykyään vaatimus on myös selvittää vikaantumisen juurisyy **RCA (Root Cause Analysis)**, eli analysoida, mitkä tekijät ovat vaikuttaneet koneenosan vikaantumiseen. Laajempaan kokonaisuutena kaikella kunnossapitotoimilla pyritään käyttöomaisuuden säilyttämiseen sellaisena, että katkeamaton tuotanto on mahdollista seuraavaan suunniteltuun huoltoseisakkiin. (Järviö 2006, 10-46.)

8 VUOTOVIRTALMIÖ

Sähkökoneiden ja generaattoreiden laakerivirta- ja akselijänniteongelmia on havainnointu jo 1900-luvun alusta lähtien. Useimmiten ne johtuivat valmistusteknisistä epätarkkuuksista, esim. koneen magneettisesta epäsymmetriasta sekä läpilyönneistä eristeissä. Nykyisten koneiden segmentoitu rakenne ai-

heuttaa epäsymmetriaa, jonka seurauksena voi syntyä varsin suuriakin vuoto-
virtoja koneen käämeistä runkoon, sekä mahdollisesti laakereiden läpi. (Lumia
2013.)

Nopeat jännitteen nousuajat synnyttävät hajakapasitansseja, joten ne voivat
aiheuttaa haitallisia korkeataajuisia vuotovirtoja koneen rakenteisiin sekä laa-
kereihin. Kytkevähäviöitä on pyritty pienentämään kasvattamalla taajuus-
muuttajien nopeuksia esimerkiksi IGB-transistoreilla, joilla voidaan saavuttaa
jopa noin 50 ms kytkentäaika. Transistoreita käyttämällä saadaan parempi vir-
ranlaatu sähkökoneille, jolloin myös harmonishäviöt pienenevät.

Laakerivirtaongelmia esiintyy myös moottoreissa, joissa käytetään taajuus-
muuttajia. Taajuusmuuttajien käyttö on lisääntyneet teollisuudessa, kun hae-
taan parempaa säädettävyyttä, ja myös niiden hinta on halventunut. Modifi-
kaatiot vanhoihinkin laitoksiin ovat nyt kannattavia energian säästön muo-
dossa, ja investointien takaisinmaksuaika on näin lyhentynyt varsin merkittä-
västi.

Laakereiden voiteluaineeseen kertyvät epäpuhtaudet muodostavat vierintäpin-
tojen kanssa omat hajakapasitanssinsa, jonka yli osa korkeataajuisesta yh-
teismuotoisesta jännitteestä voi vaikuttaa. Kun laakerijännite ylittää laakerin
voitelukalvon läpilyöntikestävyys, syntyy laakerivirtapulssi. Laakerivirrat voi-
vat olla jopa ampeerien suuruisia, korkeataajuisia ja niiden aiheuttama paikal-
linen virrantiheys voi olla suuri. Suurien virrantiheyksien vuoksi laakerien vie-
rintäpinnoille sulaa pieniä "kraatereita", mikä johtaa laakereiden mekaanisen
vaurion alkamiseen. Generaattoreissa ja myös muissa sähkökoneissa esiinty-
vät laakerivirrat voidaan jakaa seuraaviin luokkiin: matala- ja korkeataajuiset,
kiertävät ja ei-kiertävät, sekä johtuvat ja indusoituvat. (Pyrhönen 2010-11;
Mäki-ontto 2006.)

Kipinävirralla eli EDM:llä tarkoitetaan vuotovirtatyyppeä, joka aiheuttaa ki-
pinätyöstä laakerin eri komponentteihin, jolloin yleensä laakerin sisä- tai ulko-
kehälle muodostuu pyykkilautailmiö. Se muodostuu moottorin sisäisestä haja-
kapasitanssista, ja korkeataajuisesta yhteismuotoisesta jännitteestä, jolloin
potentiaaliero kasvaa yhteismuotoisen jännitteen latautuessa roottorin ja ko-
neen rungon välillä.

Kun generaattorin D-Nde -staattoripakoissa vaikuttaa suuruudeltaan erilainen magneettivuo, se aiheuttaa potentiaalieron akselinpäiden välille. Potentiaaliero muuttuu johtavalla akselilla virraksi, joka pääsee kiertämään koneessa rinkiä akselin ja rungon välillä, sekä myös laakereiden läpi. Kun akseliin varautunut jännite ylittää laakerin voiteluaineenkalvon läpäisyyden vaadittavan jännitteen (~15 V), syntyy kipinätyöstöä, jossa varautunut energia pääsee kulkeutumaan laakerin eri komponenttien läpi. Laakerijännite voi myös latautua sekä purkautua aiheuttamatta laakerivirtaa, mikäli läpilyöntikestoisuus laakerissa ei ylity ja eristys on riittävä. Kipinätyöstöä ei esiinny jatkuvasti, joten se tapahtuu ainoastaan, kun olosuhteet sille ovat olemassa. (Ahola 2011, 16-19)

9 SÄHKÖVIRRAN LÄPIKULUN AIHEUTTAMAT VAURIOT

Sähkövirta voi aiheuttaa laakeriin vakavan ja nopeasti etenevän vaurion, varsinkin jos sähkövirran läpikulku aiheuttaa laakerin osien hitsautumista kiinni toisiinsa. Vaurion tuntomerkkeinä ovat tummat, ruskehtavat tai mustanharmaat urat tai kraaterit vierintäradoissa ja -elimissä (kuva 18).



Kuva 18. Laakeriin sähkönkulun aiheuttama vaurio, ~3 kk ajon jälkeen (laakeri oli eristämätön), varsin selkeä pyykkilauta ilmiö laakerin ulkokehällä.

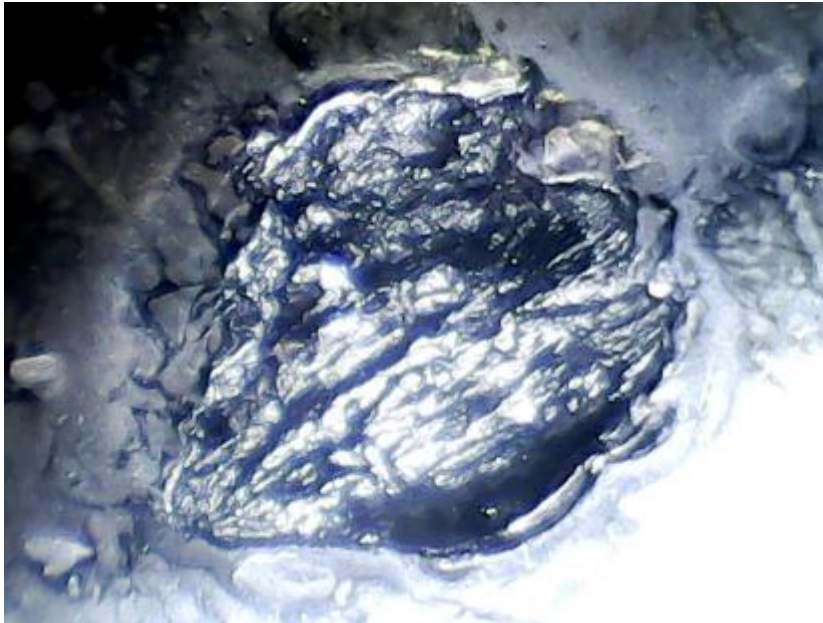
Kuulalaakerissa vierintäelimet yleensä ainoastaan tummuvat, mutta vaurion edetessä myös pinta kuoriutuu (kuva 19).



Kuva 19. Laakerinkuula, sähkönkulun aiheuttama vaurio. Laakeri oli eristetty sisäkehältään, ja kesto-ikä laakerilla ~3 vuotta.

Kuulalaakereissa vierintäratoihin saattaa muodostua siksak-kuvion muotoinen palojälki. Sähkövirran aiheuttamaa vauriota voi olla vaikea erottaa värähtelyn aiheuttamista vaurioista, mutta värähtelyvauriossa rullissa tai kuulissa ei

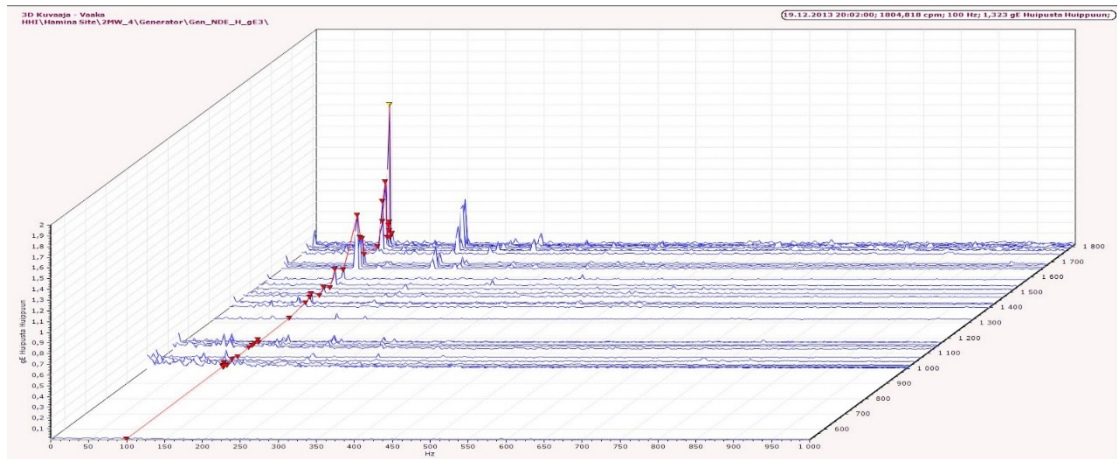
yleensä näy vaurion merkkejä. Mikroskoopilla tarkasteltaessa (~1000*suurennus), voidaan havaita varhaisessa vaiheessa olevat sähköpurkauksien aiheuttama aiheuttamat ”kraaterit” (kuva 20). Sähkövirran aiheuttamia vaurioita voidaan ehkäistä eristämällä laakeri tai siirtämällä virta kulkemaan eri kautta, joka yleensä tarkoittaa maadoitusten parantamista (Parikka & Lehtonen, 2000, 18).



Kuva 20. Laakerin ulkokehä, mikroskooppikuva 1000* suurennos, jossa havaittavissa varsin selkeä kraaterimainen syöpymä.

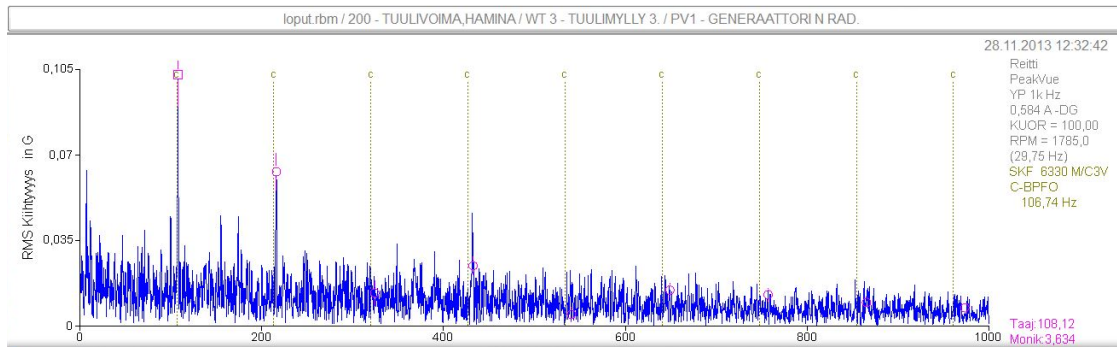
10 TYÖNKULKU JA HAVAINNOT

Tässä työssä ei tehty sähköisiä mittauksia, vaan perehdyttiin puhtaasti värähtelyjen ja visuaalisten havaintojen kautta minimoimaan laakeriongelmat ja maksimoimaan laakereiden kestoikä. Ensimmäiset havainnot mahdollisista generaattorilaakerien vaurioista saatiin lähes heti kun puisto saatiin tuotantoon (kuva 21).

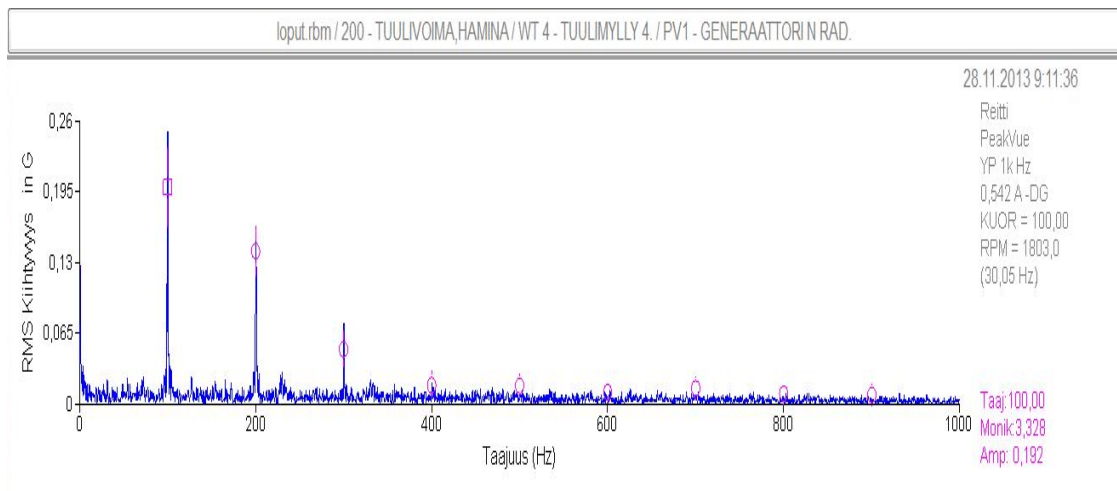


Kuva 21. Vesiputouskuvaaja, 100 Hz taajuus ja laakerin ulkokehän taajuus ~108 Hz kasvaa, kun nopeus nousee (SKF on line.)

Vuoden 2013 aikana paikan päällä tehtiin myös on line -mittauksia tukevia havaintoja, käyttämällä apuna kannettavaa CSI 2140 -analysaattoria. Mittauksista havaittiin laakerin ulkokehän ohitustaajuuden (kuva 22) muutos, sekä 100 Hz (kuva 23) taajuuden muutos ajonopeuden muuttuessa.

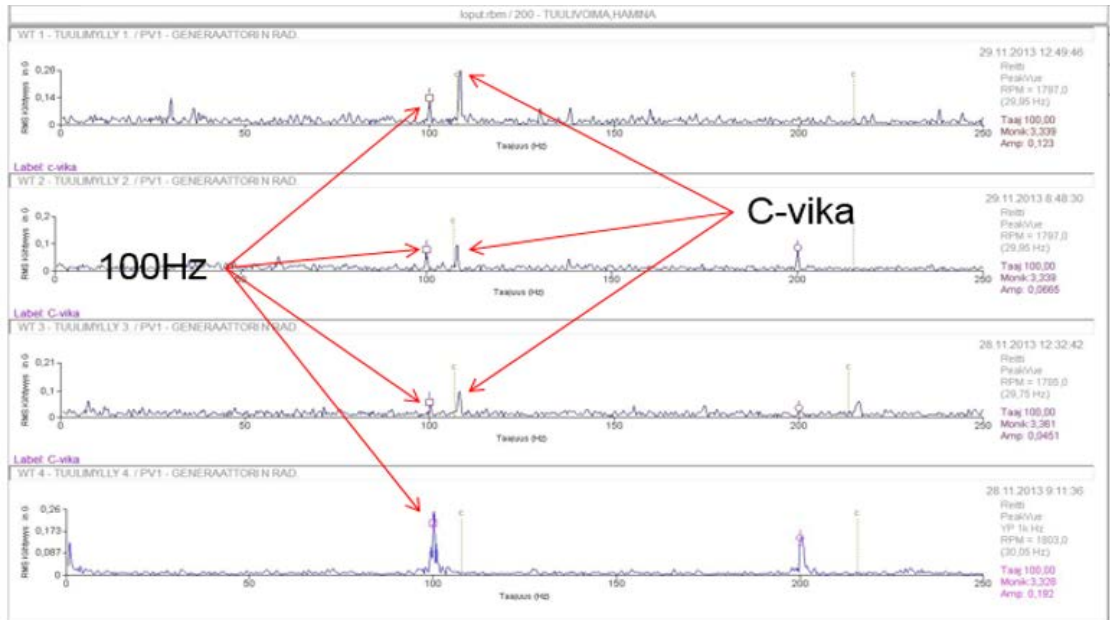


Kuva 22. Laakerin ulkokehän (C) ohitustaajuus (CSI.)

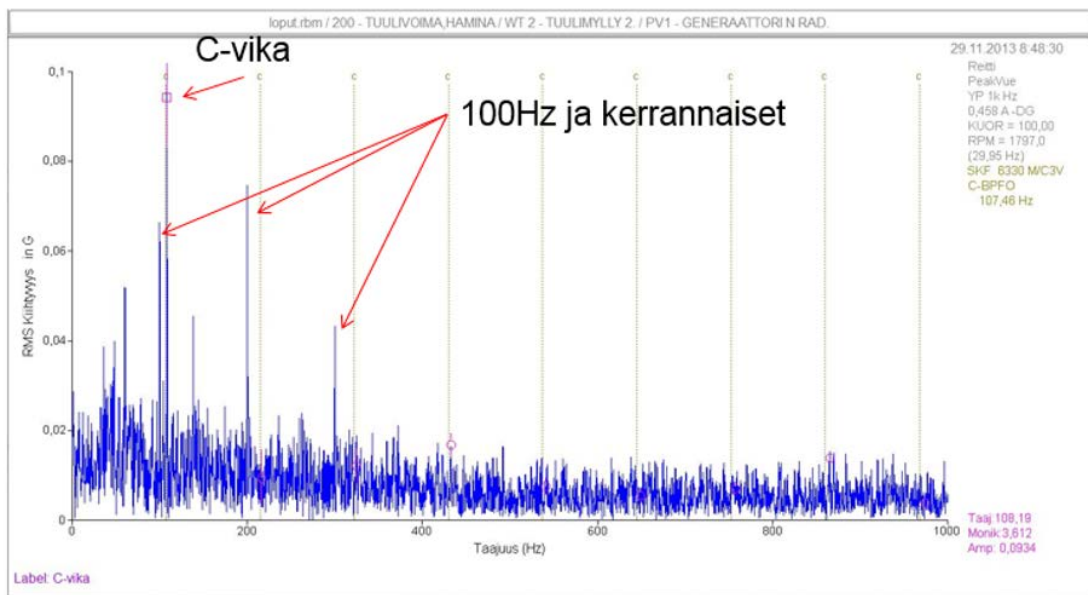


Kuva 23. 100 Hz taajuus ja kerrannaiset (CSI.)

Kaikissa neljässä puiston generaattorissa havaittiin samankaltaisia laakerin ohitustaajuuksia, sekä 100 Hz taajuuden ja sen kerrannaisten voimakasta nousua, generaattoreiden ollessa huipputuotannolla (kuvat 24, 25).



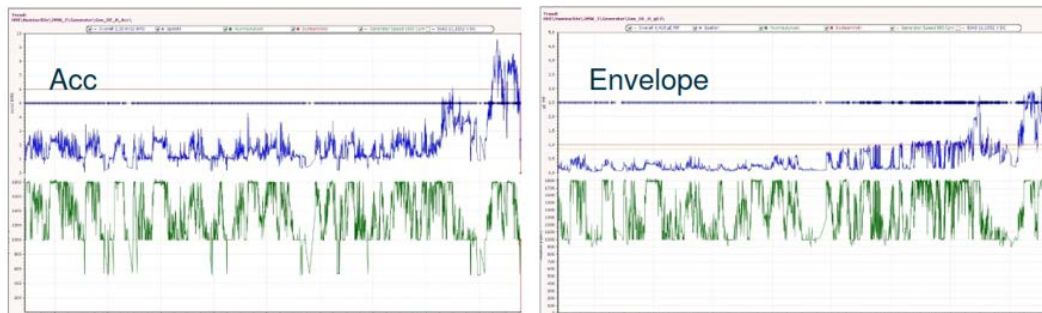
Kuva 24. Paikan päällä tehtyjä värähtelymittauksia marraskuu 2013, joissa selkeästi havaittavissa 100 Hz taajuus ja kerrannaiset. Myös laakerin ulkokehän(C) ohitustaajuus nähtävissä (CSI.)



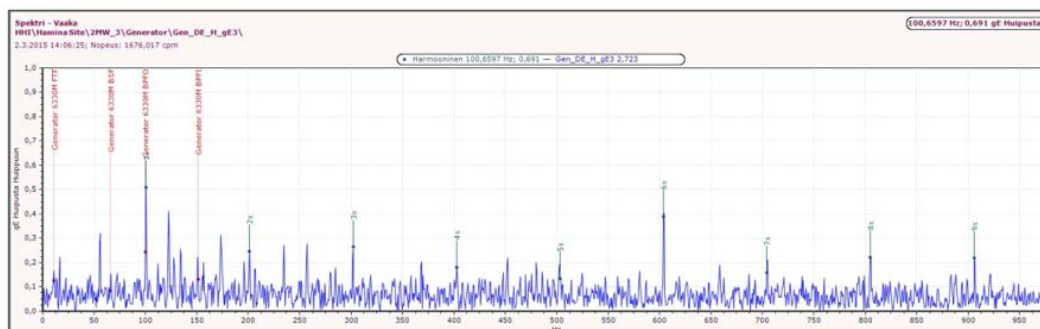
Kuva 25. Havainnot WT2 generaattorin N-pään laakerin vikaantumisesta marraskuu 2013. Generaattorin nopeuden nousesta ~1800 rpm, nousee ulkokehän (c) ohitustaajuus sekä 100 Hz ja sen kerrannaiset vallitseviksi taajuuksiksi (CSI.)

10.1 Ensimmäiset laakerin vaihdot

Ensimmäiset generaattorien laakerien vaihdot tehtiin myllyille vuonna 2015, kun värähtelytrendissä (kuva 26) tapahtui selkeä muutos ja laakerin ohitustaajuuden taso ja kerrannaiset nousivat (kuva 27).



Kuva 26. On line -järjestelmästä havaittu selkeä värähtelyn kasvu helmikuun 2015 aikana. Vasemmalla esitetty kiihtyvyyden (ACC) muutos, ja oikealla Envelope-trendikuvaajasta nähtävä selkeä värähtelyn muutos, joka on Envelope-suodatetussa värähtelyssä havaittavissa jo noin kaksi kuukautta aiemmin (CSI.)

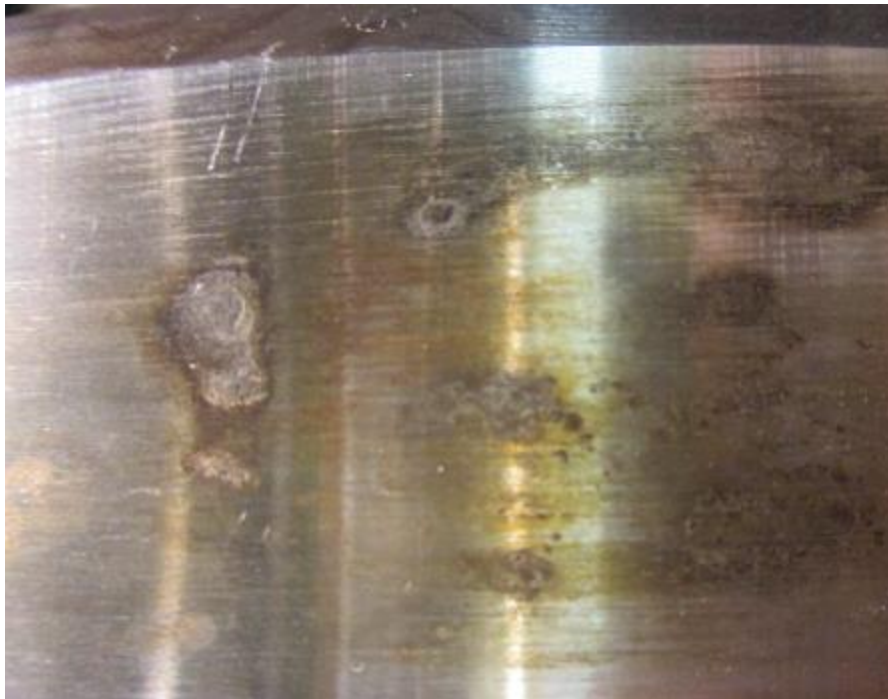


Kuva 27. Envelope gE3 -suodatuksella mitattuna havaitaan laakerin ulkokehän taajuus ja kerrannaiset jo noin kaksi kuukautta aiemmin verrattuna ”normaaliin” 2-1000 Hz taajuuskaistalla tehtävään mittaukseen (CSI.)

Laakerit vaihdettiin WT3- ja WT4-myllyjen generaattoreihin tuulimyllyjen valmistajan toimesta huhtikuussa 2015. Vaihdetut laakerit purettiin (kuvat 28-35), jotta saadaan varmistettua juurisyy laakereiden vikaantumiselle.



Kuva 28. WT4-laakeri **6330/ C3 VL 2071** joka on sisäkehältään eristetty.



Kuva 29. Laakerin ulkokehällä havaittiin vuotovirran aiheuttamaa rokotumaa.



Kuva 30. Laakerin ulkokehällä näkyy varsin voimakasta sähkönkulun aiheuttamaa "kulumaa". Mikroskoopin 1000-kertaisella suurennoksella kuluma voidaan tunnistaa kraaterimaisiksi monttuiksi, jotka ovat tyypillisiä sähkönkulun aiheuttamia vaurioita.



Kuva 31. Sisäkehällä näkyvissä harmaantunut kuormitusalue sekä "monttuja", jotka mikroskoopilla tarkasteltaessa havaitaan sähkönkulun aiheuttamiksi "kraatereiksi".



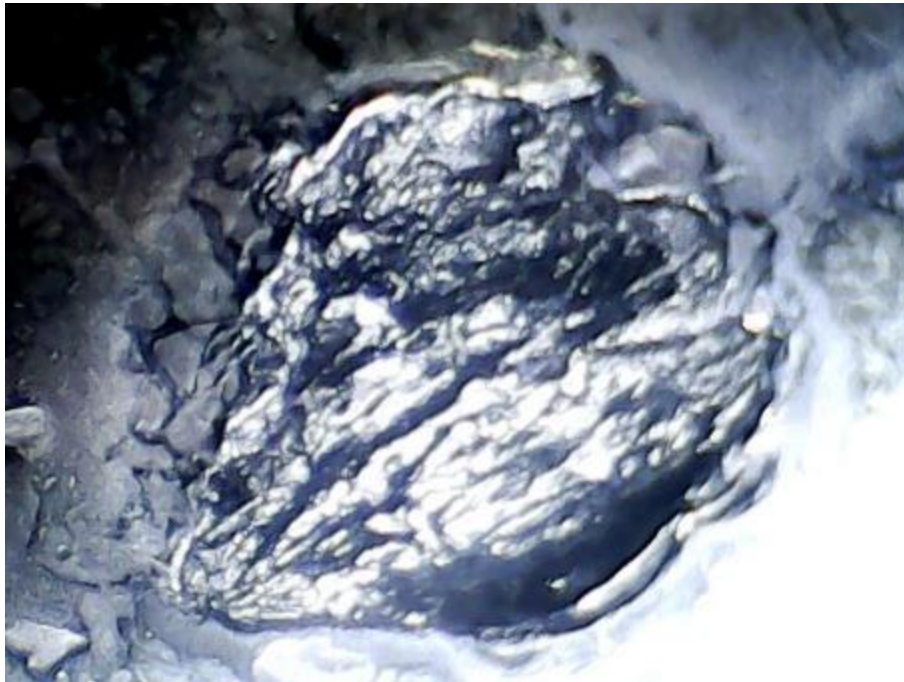
Kuva 32. Myös kuulat harmaantuneet, mikä on varsin tyypillistä sähkönkulun aiheuttamaa vauriota.



Kuva 33. Kun vaurio etenee liian pitkälle, myös laakerin kuulat antavat periksi ja voivat haljeta. Jos vikaantuminen etenee näin pitkälle, totaalinen tuho myös generaattorille on todennäköistä.



Kuva 34. Ulkokehällä paikoin isoja kuoriutumia.

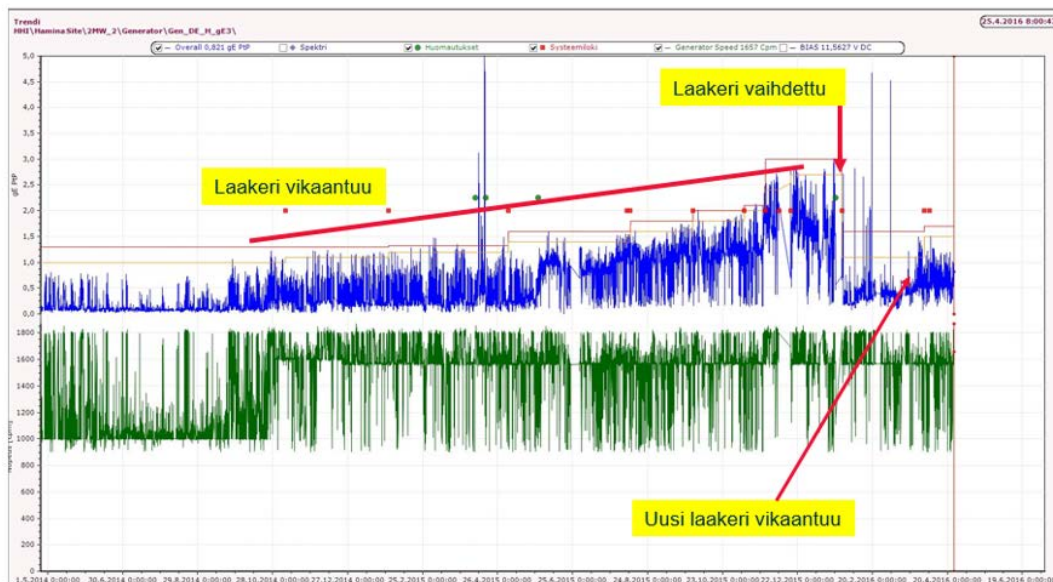


Kuva 35. Mikroskooppikuva sähkönsäädin aiheuttamasta kraaterista, jollaisia havaittiin niin sisä- kuin ulkokehälläkin.

10.2 Eristämättömän laakerin kestoikä

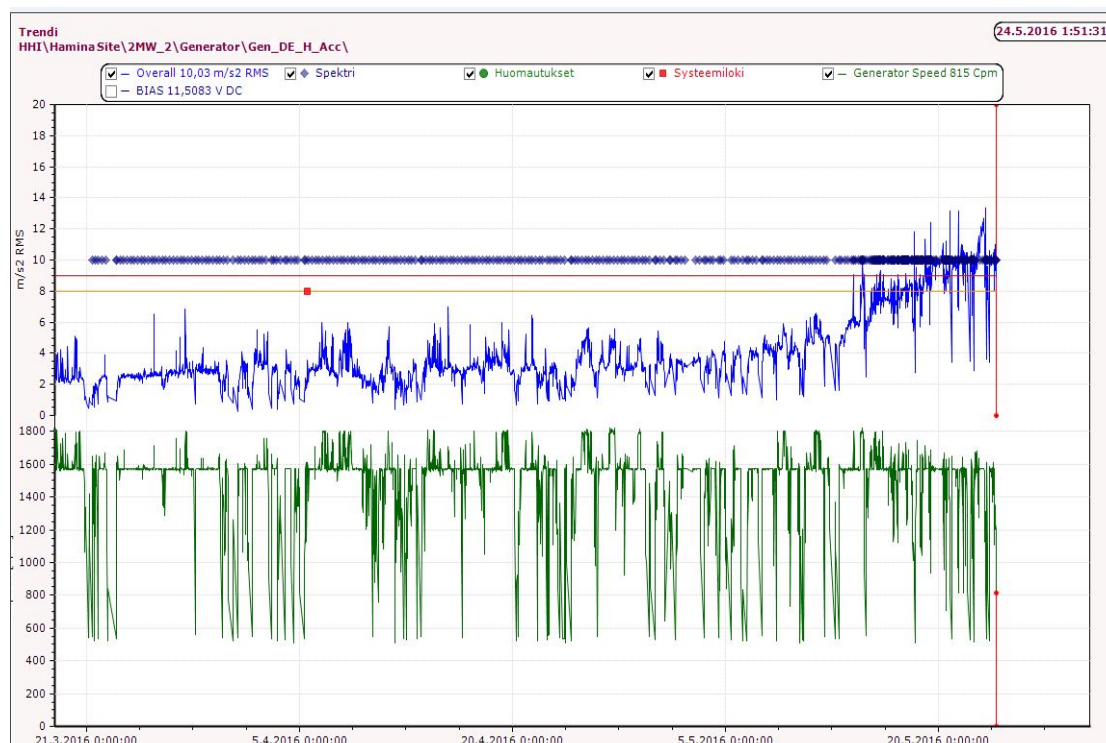
Vuoden 2016 alussa vaihdettiin WT2-generaattorin laakeri, koska värähtelytrendissä tuli selkeä muutos huonompaan suuntaan. Tuulimyllyn valmistaja päätti vaihtaa laakerin omana työnään. Valmistajan (Hyundai) päätöksellä vialliset laakerit korvattiin tavallisilla, ilman sisäkehän eristystä olevilla laakereilla, koska asentajilla ei ollut mukanaan oikeankokoisia, sisäkehältä eristettyjä laakereita. Vuosien varrella tehtyjen havaintojen ja mittausten perusteella oli

syitä olettaa, että laakerien kestoikä tulisi olemaan varsin lyhyt. Tässä tapauksessa laakereilla ajettiin ~4 kuukautta, kunnes laakerit vikaantuivat uudestaan (kuva 36).



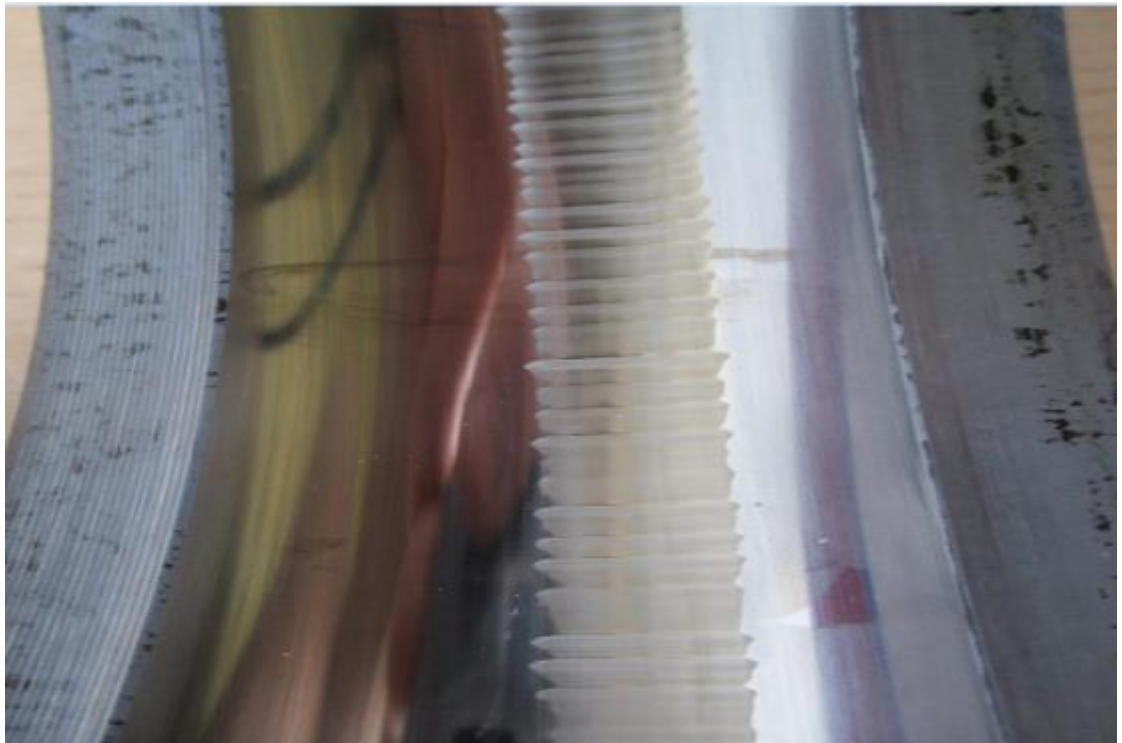
Kuva 36. Eristämätön laakeri kesti vain ~4 kuukautta, kunnes vikaantuminen aiheutti laakerin vaihdon uudestaan. Kuvassa ~2 vuoden trendi, josta voidaan havaita, että laakerin vikaantuminen oli nähtävissä jo varhaisessa vaiheessa Envelope-suodatetussa analyysissä (SKF.)

Vikaantuminen näkyi jo varsin selvästi myös kiihtyvyyssmittauksessa, (Kuva37) joten tilanteessa suositeltiin laakerin välitöntä vaihtamista eristettyyn laakeriin.



Kuva 37. Laakeri vikaantui ja värähtelyn kiihtyvyyssmittauksessakin taso nousi varsin nopeasti (SKF.)

Eristämätön 6330 M/C3 laakeri purettiin, ja siitä havaittiin varsin selkeät vuoto-
virran aiheuttamat vauriot (kuva 38).



Kuva 38. Vuotovirran aiheuttama "pyykkilauta" ilmiö, jossa mikroskoopilla tarkasteltaessa nä-
kyi kraaterimaisia monttuja.

10.3 Vuotovirtamittaus rullamitalla

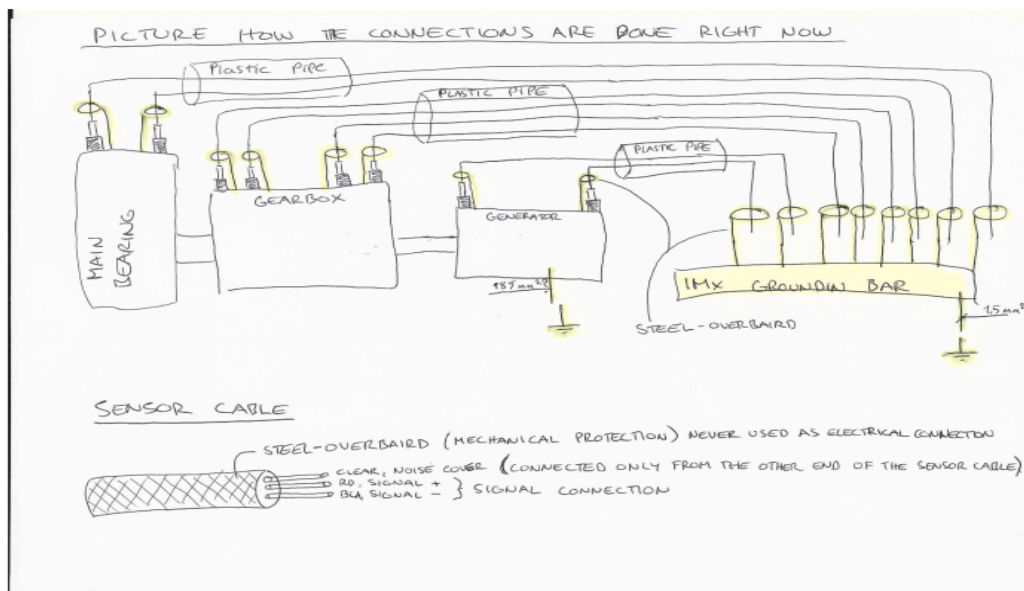
Värähtelymittauskeikalla tehtiin pikainen "vuotovirtamittaus", jossa yhdistettiin
generaattorin säätöjalka alla olevan pedin kanssa käyttämällä apuna rullamit-
taa. Valokuvassa (kuva 39) nähdään selkeästi kipinöintiä siirrettäessä "mit-
tausapuvälinettä" pitkin pedin pintaa. Tästä päätellen vuotovirtaa ilmenee var-
sin paljon, eikä laakereiden eristys ole riittävä laakerien suojaamiseksi.



Kuva 39. Kipinöintiä rullamitan ja pedin välillä. Generaattori on asennettu vaimenninkumien päälle, jolla on saadaan galvaaninen erotus pedistä. Kun rullamitta kytketty vaimenninkumin yli, syntyy kipinöintiä varsin paljon.

Mittausten aikana tehtiin havainto myös on line -järjestelmän väärästä kytkennästä (kuva 40) eli anturikaapelin metallinen suojavaippa oli kytketty virheellisesti.

Now the connection is done as follows:



Steel-overbraid should never be used in electrical connections. Clear wire should be connected from the other end of sensor cable to protect signal from environment noise.

Kuva 40. Väärä kytkentä on line -järjestelmässä, eli suojavaippa kytkettynä molemmista päistään, jolloin syntyi mahdollinen vuotovirran kulkureitti (Kirtola SKF.)

10.4 On line -kaapeloinnin korjaus

Vuotovirtoja pääsi kytkentäkaapille asti, jolloin on line -järjestelmän kautta syntyi yksi maadoitusreitti vuotovirroille. Oikea tapa kytkentään on SKF IMx-W ohjeen mukaan, tehdä kytkentä niin että suojavaippa on omassa maadoituskiskossa (kuva 41), eikä pääse kosketuksiin signaalikaapelin kanssa.

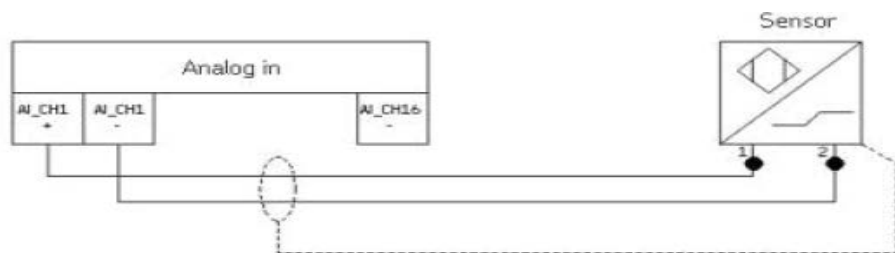
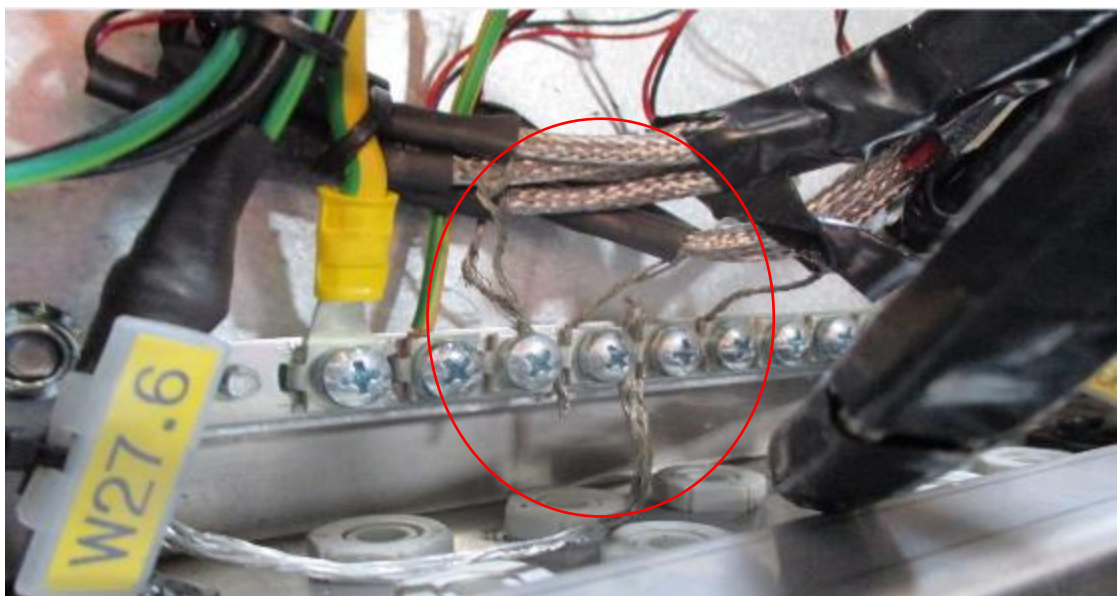


Figure 9. Connection of accelerometer sensor cables

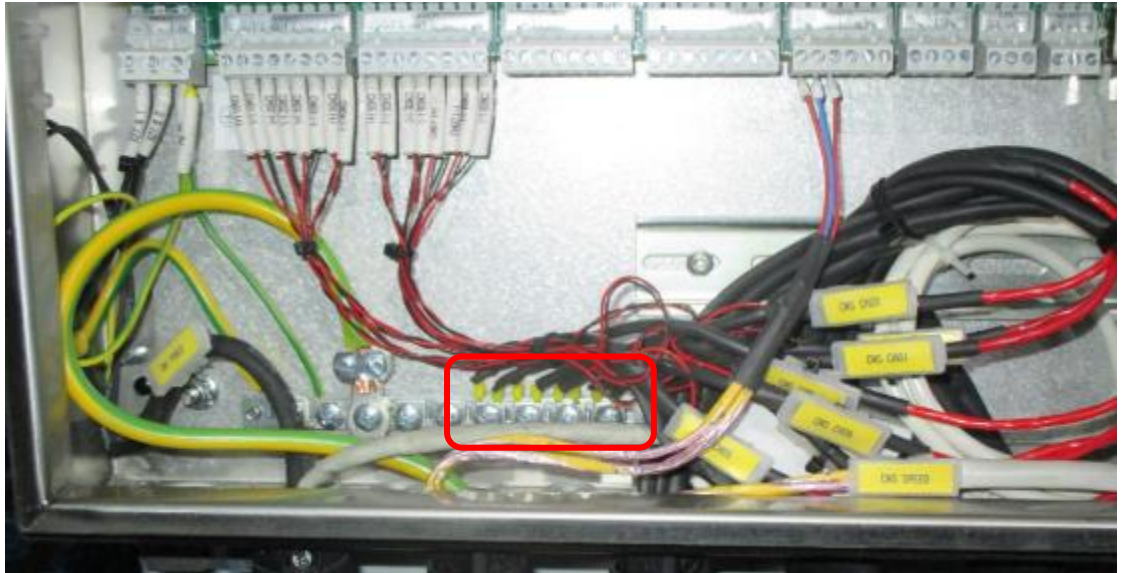
Note that the sensor shield should be connected either to the sensor or to the *IMx-W* unit depending on the cable and the sensor type.

Kuva 41. SKF:n suosittelema on line -järjestelmän antureiden kytkentä tehdään tavalla, jossa suojavaipan maadoitus vain toisesta päästä, jottei pääse syntymään silmukkaa. Näin ehkäistään mahdollisesti esiintyvien, vuotovirtojen kulkeutuminen on line -järjestelmän kautta. Huomioitava asennuksessa käytettävä anturityyppi, eli miten anturin päästä kytketty, onko vaippa kytketty anturiin vai ei (SKF IMx-W 2014).

Väärät (kuva 42) kytkennät korjattiin (kuva 43) kaikissa myllyissä, ja näin saatiin yksi vuotovirran maadoitusreitti poistettua.



Kuva 42. Väärä maadoituskytkentä, jolloin teräksinen suojavaippa kytkettynä anturin sekä kaapin maadoituskiskoon, niin että on mahdollisuus päästä kosketuksiin signaalikaapelin kanssa.



Kuva 43. Korjattu suojavaipan maadoitus, eli suojavaippa ”sukitettuna” ilman kosketusta signaalikaapeliin. Varmistettu myös läpiviennistä kaapin alla, etteivät suojavaippa ja signaalikaapeli pääse kosketuksiin.

11 RATKAISU VUOTOVIRTAONGELMIIN

HYBRIDILAAKERIT

Keraamiset laakerit eli hybridilaakerit (kuva 44) ovat sähköisessä mielessä paras ratkaisu jos havaitaan laakerivirtaongelmia. Hybridilaakereiden rakenteessa käytetään eristäviä keraamisia vierintäelimiä, jolloin laakerin ulko- ja sisäkehän välinen kapasitanssi jää pieneksi, ja virrankulku estyy.

Hybrid bearings have rings of bearing steel and rolling elements of bearing grade silicon nitride (ceramic)



Comparison of material properties

Properties	Bearing steel	Bearing grade silicon nitride
Compressive strength [MPa]	~2 300	3 000
Tensile strength [MPa]	~1 900	800
Elastic modulus [GPa]	210	310
Hardness HV10 [kg/mm ²]	700	1 600
Electr. resistivity [Ωm]	0,4 × 10 ⁻⁶ (conductor)	10 ¹² (insulator)
Density [g/cm ³]	7,9	3,2
Coefficient of thermal elongation [10 ⁻⁶ /K]	11,7	3

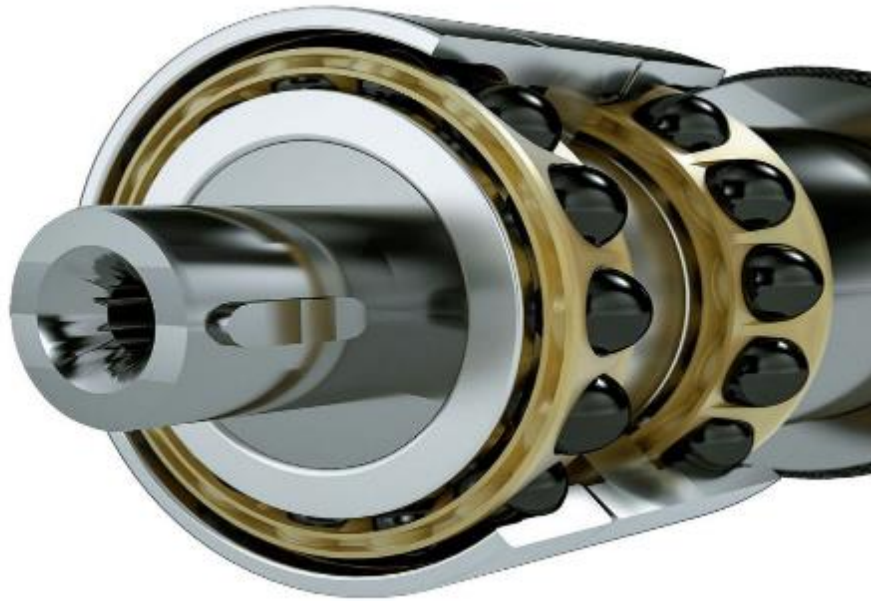


Kuva 44. SKF hybridilaakerin speksejä (SKF bearing catalog 2017.)

Hybridilaakereita käyttämällä voidaan estää laakerivirrankulku laakereiden läpi lähes kokonaan, hyvän eristävyytensä ja pienen kapasitanssinsa (koosta riippuen noin 40 pF) ansiosta. Metallikontaktia hybridilaakerissa ei pääse käytännössä koskaan syntymään, joten myöskään laakerivirtaongelmaa ei pääse muodostumaan. Hybridilaakerit ovat monilta mekaanisiltakin ominaisuuksiltaan normaaleja laakereita parempia. Hybridilaakerien hinta, verrattuna sisä- tai ulkokehältäään eristettyihin laakereihin, on noin kaksinkertainen. Joten kalliimpi hinta kompensoituu jo ensimmäisen laakerin vaihdon jälkeen, varsinkin kun oletuksena on hybridilaakerin pidempi käyttöikä.

SKF on ollut edelläkävijä hybridilaakerien kehittäjänä, ja nykyisillä valmistusmenetelmillä on laakerista saatu jo varsin kilpailukykyinen hinnaltaan. Hybridilaakeria käytetään kohteissa missä vaaditaan parempaa kierroskestävyyttä, ja pitkiä huoltovälejä rasvan kestävyuden suhteen. Hybridilaakeri on parhaimmillaan kohteissa missä laakeriin voi päästä hiovia partikkeleita, voitelu on puutteellista, mutta suurin käyttökohde on paikoissa missä esiintyy vuotovirta ongelmia, kuten esimerkiksi tuulimyllyjen generaattorin laakeroinnit. (SKF Hybrid bearings 2017.)

Hybridilaakereita käytetään yhä useammin haasteellisissa ympäristöissä toimivissa sovelluksissa, kuten nopeakäyntiset öljyttömät ilmastointi- ja kylmäkompressorit, sekä sähkökoneet (kuva 45) ja vaihteistot.



Kuva 45. Hybridi laakereita käytetään jo varsin monissa kohteissa joissa on havaittu vuotovirtojen aiheuttamia vaurioita, ja tuulimyllyjen generaattorit ovat yksi sellaisista. (kuva SKF bearing Evolution 2017.)

Joissakin näistä sovelluksista on sekä raja- että sekavoitelujärjestelmä, jolloin kiinteiden hiukkasten pääseminen voiteluaineen sekaan vaikuttaa laakereiden suorituskykyyn alentavasti. Raja- tai sekavoitelujärjestelmän tapauksessa, laakerinvierintäradat saattavat altistua varhaiselle kulumiselle ja pinnan alaiselle väsymiselle. Likaisessa ympäristössä, jossa kiinteät hiukkaset pääsevät vierintäelinten ja -ratojen väliin, voi aiheuttaa kitkan nousua ja voitelukalvon heikkenemistä.

Vuotovirtojen on havaittu olevan yksi tekijä mikä vaikuttaa voitelukalvon pettämiseen ja osaltaan lisää kitkaa, jos syntyy kraaterimaisia monttuja vierintä radoille. On osoitettu kokeellisesti sekä mallinnustuloksia vertailemalla, että laakeripintojen ollessa ohutkalvolla hybridilaakerien fysikaaliset mekanismit ja suorituskyky verrattuna teräslaakereihin, on huomattavasti parempi.

Myös tehollisen raja-kitkakertoimen huomattava vähennys on nähtävissä, kun verrataan heikossa raja- tai sekavoitelutilanteessa keskenään hybridilaakeria ja teräksistä laakeria. (SKF Hybrid bearings 2017.)

12 JATKOTUTKIMUS

Opinnäytetyön mittausten aikana, vuosina 2012-2017, ei saatu värähtelydataa, mistä voidaan todentaa laakerityypin vaihdon vaikutusta värähtelyyn ja käytettävyyteen. Myöskään suositeltuja generaattorin maadoitusten parantamisia ei tehty, koska generaattorin valmistaja ei niitä katsonut tarpeellisiksi.

Joulukuussa 2017 vaihdettiin ensimmäinen hybridilaakeri WT1 generaattorin D-päähän, joten vuoden 2018 ensimmäisellä kvartaalilla, saadaan jo tuntuma hybridilaakerin värähtelykäyttäytymiseen. Verrokkina voidaan käyttää WT1 generaattorin N-pään laakeria, mitä ei vaihdettu. Vuoden 2018 lopulla voidaan todeta, mikä vaikutus laakerin kestoon ja ajettavuuteen saavutettiin.

Todennäköistä on, että N-pään laakerin vikaantuminen on nyt nopeampaa, koska vuotovirran kulku D-päästä on estetty, joten mahdollisen vuotovirran kulku N-päästä mahdollisesti vähintäänkin tuplaantuu. Suosituksena oli, että molempien päiden laakerit vaihdettaisiin samanaikaisesti, mutta niin ei nyt tehty, koska vikaantuminen N-pään laakerissa ei vielä ole nähtävissä värähtelyspektrissä.

Myöskin mahdolliset maadoitusten parantamiset generaattoreiden rungoista, on vielä kokeilematta, koska valmistaja ei niitä ole katsonut tarpeellisiksi.

Tämän opinnäytetyön puitteissa ei asiaa enää ehditä tutkimaan, joten siinä on mahdollinen jatkotutkimuksen paikka.

LÄHTEET

ABB. 2011. Bearing currents in AC drives. ABB Technical information. Technical guide No.5. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/8c253c2417ed0238c125788f003cca8e/ABB_Technical_guide_No5_RevC.pdf [viitattu 12.2.2016].

Ahlman, H. 1984. Maintenance Effectiveness and economic models in the terotechnology concept. Maintenance Management International 4, s. 131-139.

Ahola, J. Taajuusmuuttajaohjattujen sähkömoottorikäyttöjen laakerivirrat ja niiden mittaaminen. 28.9. 2011. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Luentomoniste. 37 s.

Gurvits, F. 2008. Airice Oy. Saatavissa: <http://airice.fi/fi/> [viitattu 12.5.2016].

Hyundai Heavy Industries. 2012. Tuuliturbiinin käyttöohjekirja. SV-MAK-1-W05-MAN-025-B. Salattu julkaisu.

Järviö, J. 2006. Kunnossapito. Helsinki: KP-Media Oy.

Lumia, J. 2013. Vuotovirran diagnosointi hammasvaihteessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Konetekniikka. Saatavissa: <https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21735/Lumia.pdf?sequence=1> [viitattu 12.5.2017].

Mäki-Ontto, P. 2006. Modeling and reduction of shaft voltages in AC motors fed by frequency converters. Väitöskirja. Helsingin teknillinen korkeakoulu, sähkö- ja tietoliikennetekniikka.

Oh, H.W & Willwerth, A. 2008. Shaft Grounding – A Solution to Motor Bearing Currents. ASHRAE Transactions, vol. 114, part 2, 2008. Saatavissa: <https://pdfs.semanticscholar.org/265b/610948bb52de61ddf9c6acf65885b48481.pdf> [viitattu 14.9.2017].

Parikka, R. & Lehtonen, J. 2000. Kulumismekanismit ja niiden merkitys vierintälaakereiden eliniälle. Raportti BVAL73-001074. Espoo, VTT. Saatavissa: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj3/prognos/prognos/pdf/kulumismekf.pdf> [viitattu 11.12.2017].

Pyrhönen, J. 2010-11. Electrical Drives. Luentoaineisto. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikka. Lappeenranta.

Reeves, T. 1999. PeakVue data collection techniques for the RBM analyst. Knoxville, Computational Systems, Inc.

Rockwell Automation. 2002. Inverter-driven induction motors shaft and bearing current solutions. Rockwell Automation. http://avahvacpro-ducts.com/uploads/Rockwell_WP.pdf [viitattu 15.4.2016]

SKF Catalog. 2017. Extra large (XL) hybrid deep groove ball bearings from SKF. Technical product sheet. Saatavissa: <http://www.skf.com/us/products/mrc/hybrid-ceramic-ball-bearings/index.html> [viitattu 12.9.2017].

SKF Evolution. 2017. Brizmer, V., Gabelli, A., Kadin, Y., Morales-Espejel, G.E. & Vieillard, C. Benefits of hybrid bearings in severe conditions. Asiakaslehti Evolution. Saatavissa: <http://evolution.skf.com/wp-content/uploads/2017/06> [viitattu 12.5.2017].

SKF Forum. 2017. Energia ja ympäristö kulkevat käsi kädessä. SKF Forum, No. 30. SKF Sverige AB. Ruotsi. Saatavissa: <http://www.skf.com/binary/123-235149/SKF-FORUM-30-FI.pdf> [viitattu 12.5.2017].

STY. 2016. Tietoa tuulivoimasta. Saatavissa: <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoima-suomessa-ja-maailmalla/tuulivoima-suomessa> [viitattu 12.2.2016].

Särkimäki, V. 2009. Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors. Tohtorinväitöskirja. Energiatekniikka. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Digipaino 2009. Lappeenranta.

Tekniikka ja talous. 9/2017. Alma Manu. Tampere.

Turkia, V. & Holttinen, H. 2013. Tuulivoimaloiden tuotantotilastot. Vuosiraportti 2013. Espoo. VTT Technology.

VTT. 2016. Suomen tuulivoimatilastot. Saatavissa: [www.vtt.fi/palvelut/vahahii-
linen-energia/tuulivoima/suomen-tuulivoimatilastot](http://www.vtt.fi/palvelut/vahahii-
linen-energia/tuulivoima/suomen-tuulivoimatilastot) [viitattu 12.2.2016].