

## **Biotuotetehtaan laakerivirtamittaukset**

Teemu Tirkkonen

Opinnäytetyö  
Joulukuu 2019  
Tekniikan ala  
Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka

Tekijä(t) Tirkkonen, Teemu	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Joulukuu 2019
	Sivumäärä 47	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Biotuotetehtaan laakerivirtamittaukset</b>		
Tutkinto-ohjelma Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka		
Työn ohjaaja(t) Pasi Puttonen, Olli Väänänen		
Toimeksiantaja(t) Botnia Mill Service		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Laakerivirrat ovat viimeisen kahdenkymmenen vuoden ajan olleet laajasti tutkittu aihe, ja erityisesti taajuusmuuttajaohjausten aiheuttamat laakerivirtaongelmat ovat korkeilla kytkentätaajuuksilla varustettujen sähkökäyttöjen yleistymisen jälkeen nousseet jälleen ajankohtaisiksi. Opinnäytetyössä toteutettiin laakerivirtamittauksia Äänekosken biotuotetehtaan sellun kuivaus- ja paalaamo-osastoilla. Työn tavoitteena oli laakerivirtaongelman todentaminen mittauksin ja virta-arvojen pienentäminen standardin viitearvojen mukaisiksi.</p> <p>Laakerivirtoja ei ole mahdollista mitata suoraan, joten kaikki mittauksista saadut tulokset ovat vain suuntaa-antavia. Epäsuorillakin mittauskytkennöillä ilmiötä voidaan kuitenkin havainnollistaa ja nähdä virta-arvoja pienentävien toimenpiteiden vaikutus.</p> <p>Mittauksiin valittiin tyhjiöpumppumoottoreita, joissa oli jo aiempaa epäilystä laakerivirroista. Moottoreille toteutettiin tyyppisten kiertovirran ja akselin läpi menevän virran mitausten lisäksi rungon ja akselin jännitemittaukset, summavirran ja maadoituskapeleiden mittaukset. Mitattuja virta-arvoja vertailtiin PSK:n kokemuspohjaisiin arvoihin haitallisuuden määrittämiseksi ja testattiin, saadaanko rajoittavien toimenpiteiden avulla virran suuruutta laskettua standardin alaraja-arvoihin. Mittauksiin perustuen moottoreihin kehitettiin myös pysyvästi virran suuruutta moottorilähdössä rajoittava menetelmä.</p> <p>Virran pienentämiseksi kehitellyt toimenpiteet vaativat kuitenkin laitehankintoja, joiden saapumisessa tehtaalle saattaa kestää viikkoja. Lisäksi asentaminen moottoriin vaatii moottorin pysäyttämistä ja jopa alueen seisokkia, joten uusintamittaukset korjausmenetelmää soveltaneisiin moottorilähtöihin jäivät opinnäytetyössä toteuttamatta.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Laakerivirrat, yhteismuotoinen virta, kiertovirta, akselin maadoitusvirta		
Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)		

Author(s) Tirkkonen, Teemu	Type of publication Bachelor's thesis	Date Joulukuu 2019 Language of publication: Finnish
	Number of pages 47	Permission for web publication: x
	Title of publication <b>Bearing current measurements in a bioproduct mill</b>	
Degree programme Engineer (Bachelor), electrical and automation engineering		
Supervisor(s) Pasi Puttonen, Olli Väänänen		
Assigned by Botnia Mill Service		
Abstract  <p>In the last few decades, bearing currents have been extensively studied subject, especially since the amount of frequency converter powered motors have been steadily increasing. The bearing current measurements presented in this thesis were done in a pulp drying area of a bioproduct mill located in Äänekoski. The purpose of the thesis was to map out the drives that suffer from bearing currents and to lower these currents to a minimum.</p> <p>Bearing currents can't be directly measured over the bearing, so all the results from the measurements were just directional. By using different measuring techniques or by creating an alternative low impedance path for the current to go through, the phenomenon could be monitored and examined. Thus, it could be shown how applying the chosen reduction method affects the current.</p> <p>The vacuum pump motors selected for the measurements had already been suspected to suffer from bearing currents. In addition to the typical circulating bearing current measurements and measuring the current directly over the axle, the potential difference of the frame and the axle, grounding cables and the sum of the feeding cables were measured. The measured values were compared to the PSK standard to determine the harmfulness of the current.</p> <p>Based on the measurements, a method that would permanently reduce the amount of the bearing currents in the motor was developed. Since it might take several weeks for the supplier to deliver the product that could be used to lower the amount of the current, it was decided to exclude the measurements with the product installed in place. To install the product to the motor, the motor itself and even the whole area must be halted, so the re-measurements with the installed product were not included in the thesis.</p>		
Keywords/tags (subjects) Bearing current, common-mode current, circulating bearing current, rotor ground current		
Miscellaneous (Confidential information)		

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto .....</b>	<b>5</b>
1.1	Yritysesittely.....	5
1.2	Työn lähtökohtien esittely.....	5
1.3	Tutkimustyyppi.....	6
<b>2</b>	<b>Laakerivirtojen muodostuminen .....</b>	<b>6</b>
2.1	Syntymekanismit.....	6
2.2	Yhteismuotoinen jännite.....	7
2.3	Kytkeytyminen .....	9
2.4	Virtojen kiertoreitit moottorissa .....	10
	2.4.1 Kapasitiivinen purkausvirta.....	11
	2.4.2 Kiertovirta.....	12
	2.4.3 Akselin maadoitusvirta .....	12
<b>3</b>	<b>Laakerivirtojen rajoitusmenetelmät .....</b>	<b>13</b>
3.1	Oikeaoppiset asennustavat .....	13
	3.1.1 Symmetriset kaapelit.....	13
	3.1.2 Häiriösuojattu kaapeli.....	14
	3.1.3 Suuritaajuiset potentiaalintasauskytkennät .....	14
3.2	Muita toimenpiteitä .....	15
<b>4</b>	<b>Laakerivirtojen mittaaminen .....</b>	<b>17</b>
	4.1.1 Akselin maadoitusvirran ja kiertovirran mittaaminen .....	17
	4.1.2 Kapasitiivisten virtojen mittaaminen .....	19
<b>5</b>	<b>Mittausten toteutus .....</b>	<b>19</b>
5.1	Tarvehankinnat .....	19
	5.1.1 Oskilloskooppi .....	19
	5.1.2 Mittakelat.....	20
	5.1.3 Muut tarvehankinnat.....	21
5.2	Mitattavien moottoreiden valinta.....	22
5.3	Mittausten esivalmistelut.....	23
5.4	Tyhjiöpumppumoottorit.....	24

	2
5.4.1 Viiran tyhjiöpumppumoottori 231P171 .....	25
5.4.2 Suorat moottorilähdöt kombin ja kengän tyhjiöpumput 231P173 ja 231P174 .....	34
5.4.3 Lumppurin tyhjiöpumppu 231P172 .....	35
5.5 Kuivauskoneen puhaltimet.....	43
<b>6 Tulosten analysointi .....</b>	<b>44</b>
<b>7 Johtopäätökset .....</b>	<b>45</b>
<b>Lähteet .....</b>	<b>46</b>

## Kuviot

Kuvio 1. Kolmen vaiheen väliset jännite- ja virtaosoittimet (Ahoranta 2008, 310)	7
Kuvio 2. Taajuusmuuttajan vaiheiden summan ajan hetkellä $t$ tuottama jännite $V_{cm}$ (PSK 7708 2004, 5) .....	8
Kuvio 3. Kiertävän virran ja akselin maadoitusvirran muodostuminen sekä kulkureitti vaipan ja kuorman maapisteen kautta takaisin taajuusmuuttajalle (Grounding and cabling of drive systems 2013, 12) .....	8
Kuvio 4. Moottorissa esiintyvien hajakapasitanssien ekvivalenttipiiri (Muetze 2004, 9) .....	9
Kuvio 5. Kapasiivisen virran kulkusuunta moottorissa (Särkimäki 2009, 19) ....	11
Kuvio 6. Kiertovirran reitti moottorissa (Särkimäki 2009, 21).....	12
Kuvio 7. Akselin maadoitusvirran kulkureitti rungon ja akselin kautta maapisteeseen (Särkimäki 2009, 22).....	13
Kuvio 8. Akselin maadoitusvirran (B) ja kiertävän virran (A) mittaaminen (PSK 7708 2004, 7) .....	18
Kuvio 9. Summavirran ja moottorin rungon ja kytkimen välillä olevan oikosulkulenkin mittaaminen (PSK 7708 2004, 7, muokattu) .....	18
Kuvio 10. Yhteismuotoisen virran mittaamiseen tarkoitettujen kelojen toimintaraja-arvoja (Rogowski probe for measuring hf common mode currents in VSDs 2018, 2).....	20

Kuvio 11. Rogowski-kelan ja integraattoriyksikön toimintaperiaate (Application notes 2002, 2) .....	21
Kuvio 12. Kytkinsuojaan rakennettu luukku .....	24
Kuvio 13. Suoraan akselin läpi kulkevaa virtaa mittaava virtalenkki kanavalla 1, moottorin rungon ja kytkimen välistä maadoitusta mittaava virtalenkki kanavalla 2 .....	26
Kuvio 14. Akselin läpi kulkevaa virtaa mittaava virtalenkki kanavalla 1. Moottorin rungon ja kytkimen välistä maadoitusta mittaava virtalenkki kanavalla 2 .....	27
Kuvio 15. Akselin läpi kulkevan virran muutos rungon maadoittamisen jälkeen. Kanavalla 2 ei mittauksia .....	28
Kuvio 16. Akseli maadoitetaan hiilen avulla potentiaalintasauskiskolle ja mitataan virrassa tapahtuvia muutoksia .....	29
Kuvio 17. Akselin ympärillä oleva virtalenkki kanavalla 1, potentiaalintasauskiskolle kytkettyä kaapelia mittaava virtalenkki kanavalla 2.	30
Kuvio 18. Rungon erillismaadoitus kanavalla 1, summavirtamittaus kanavalla 2	30
Kuvio 19. Kiertovirran mittaaminen moottorilta hiilen avulla .....	31
Kuvio 20. Hiilellä akselilta mitattu virta. Kanavalla 2 ei mittauksia .....	32
Kuvio 21. Kytkimen ja työkoneen välisen akselin mittaus kanavalla 1, näitä yhdistävän maadoituksen virta kanavalla 2.....	33
Kuvio 22. Virtalenkillä akselilta mittaaminen ja moottorin runkoa ja kytkintä yhdistävän maadoituskaapelin mittaus.....	36
Kuvio 23. Akselilta mitattu virta kanavalla 1, kytkimen ja moottorin rungon välinen maadoituskaapelin virta kanavalla 2.....	36
Kuvio 24. Rungon potentiaalintasauskiskolle menevän maadoituskaapelin virta ja summavirta. Maadoituskaapeli kanavalla 1, summavirta kanavalla 2.....	37
Kuvio 25. Runko maadoitettiin tilassa olevaan potentiaalintasauskiskoon ja mitattiin maadoituksen läpi kulkevaa virtaa.....	38
Kuvio 26. Jännitteen mittaus moottorin rungon ja potentiaalintasauskiskon väliltä. Jännitemittaus kanavalla yksi, kanavalla kaksi ei mittauksia .....	38
Kuvio 27. Kiertovirran mittaus D-pään laakerit ohittamalla kanavalla 1. Kanavalla 2 akselin yli oleva virtalenkki .....	39
Kuvio 28. Jännitemittaus moottorin akselin ja rungon väliltä.....	40

Kuvio 29. Akselin yli mitatun virran suuruus kanavalla 1, kanavalla 2 moottorin rungon ja kytkimen välinen maadoitus .....	41
Kuvio 30. Kanavalla yksi akselia pitkin kulkevan virran suuruus, kanavalla kaksi hiilen potentiaalintasauskiskolle maadoittaman virran suuruus .....	41
Kuvio 31. Puhallinkaapista irrotetussa moduulissa sijaitseva moottori .....	43

## Taulukot

Taulukko 1. Virran tyyppi ja korjaavien toimenpiteiden vaikutus (Särkimäki 2009, 33, muokattu).....	15
Taulukko 2. Akselin läpi kulkevan virran suuruuden vertailu standardin raja-arvoihin (PSK 2004, 11) .....	27
Taulukko 3. Akselilta mitatun virran vertailu standardin raja-arvoihin (PSK 2004, 11) .....	32
Taulukko 4. Hiilellä akselilta saatujen virta-arvojen vertailu kytkimen ja työkoneen väliseltä akselilta saatuun virtaan (PSK 2004, 11) .....	33
Taulukko 5. Moottorille 231P173 toteutettujen mittausten vertailua standardin arvoihin (PSK 2004, 11) .....	34
Taulukko 6. Moottorille 231P174 toteutettujen mittausten vertailua standardin arvoihin (PSK 2004, 11) .....	35
Taulukko 7. Kiertovirran mittauksen arvoja standardiin vertailtuna (PSK 2004, 11) .....	40
Taulukko 8. Akselin normautilan, rungon lisämaadoituksen ja potentiaalintasauskiskolle maadoitetun akselin virran keskiarvot (PSK 2004, 11) .....	42
Taulukko 9. Kytkimen ja työkoneen välisen akselin virran mittaus (PSK 2004, 11) .....	42

# 1 Johdanto

## 1.1 Yritysesittely

Botnia Mill Service on vuonna 1997 perustettu metsäteollisuuden kunnossapitopalveluihin erikoistunut yritys. Yrityksessä työskentelee noin 380 henkilöä seitsemässä eri toimipaikassa ympäri Suomea. Käynnissä- ja kunnossapitopalveluiden lisäksi yritys tarjoaa suunnittelu- ja projektointitoimintaa. Liikevaihto Botnia Mill Servicellä oli vuonna 2018 60 miljoonaa euroa. (Puromäki 2018.)

BMS vastaa kokonaisuudessaan sellu- ja biotuotevalmistaja Metsä Fibren Suomen tehtaiden kunnossapidosta. Omistussuhteiltaan Botnia Mill Service on jakautunut Metsä Fibren ja emoyhtiö Caverion Industrian kesken, joista Fibrellä pieni enimmäisomistus 50,1%. (Puromäki 2018.)

Äänekosken vanhan sellutehtaan alueelle valmistui Metsä Fibren biotuotetehtas vuonna 2017. Metsä Fibre kuuluu osaksi Metsä Groupia, joka käsittää Metsän muun yritystoiminnan, kuten saha- ja muun puun jatkokäsittelytoiminnan. Konzernin emoyrityksenä toimii Metsäliiton osuuskunta (Biotuotetehtaan yleisesittely 2017). Opinnäytetyö toteutettiin Äänekosken uudella biotuotetehtaalla. Toimeksiantajana työssä oli kunnossapidosta alueella vastaava Botnia Mill Service.

## 1.2 Työn lähtökohtien esittely

Laakereiden kuntoon ja vaihtotarpeen selvittämiseen tehtaalla käytetyistä värähtelymittauksista on huomattu taajuusspektristä laakerivirtoihin viittaavia tuloksia. Alueella toteutettiin ennen uuden tehtaan käyttöönottoa alustavia mittauksia ulkoisen toimijan toimesta, mutta ongelman epäillään pahentuneen. Laakerivirtoja saattaa esiintyä muuallakin alueella mutta opinnäytetyössä keskitytään valikoitujen kuivaa-  
mon ja paalaamon uuden tehtaanosan moottorilähtöihin.



### 1.3 Tutkimustyyppi

Tutkimustyyppinä kyseessä on kvantitatiivinen tutkimus. Toimeksiantajalle on haittaa laakereihin muodostuvista ja niiden elinikää lyhentävistä virroista. Ongelmaan laadusta ja laajuudesta kerätään tietoa eri mittausmenetelmin. Tuloksia tulkitaan ja työn antaneelle osapuolelle ehdotetaan ongelmaa korjaavia toimenpiteitä. Tutkimuskysymys: löytyykö kuivaamoalueen moottorilähdöistä haitallisen suuria laakerivirtoja ja kuinka haitallisia virtoja voidaan rajoittaa?

## 2 Laakerivirtojen muodostuminen

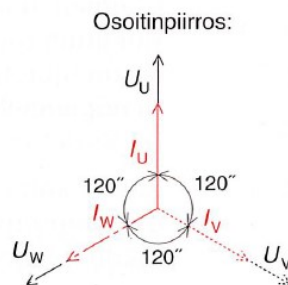
### 2.1 Syntymekanismit

Moottorien laakereihin kohdistuu monenlaista rasitusta. Laakerien todelliseen käyttöikään vaikuttaa ympäristön puhtaus, voitelu, linjaus sekä käyttötarkoituksen luoma rasitus, kuten kuormitus ja värinän määrä (SKF- laakerien kunnossapito 2016, 28). Näiden lisäksi laakerin kulutusta saattavat lisätä laakerien kautta kulkevat virrat.

Moottoreiden magneettisen epäsymmetrian vuoksi syntyneet laakerivirrat ovat olleet tunnettuja jo 1900-luvun alkupuolelta lähtien. Magneettisen epäsymmetrian vuoksi staattoriselkään muodostuu vuo, joka aikaansaa akselijännitteen ja aiheuttaa moottoriin kiertävän virran. Moottoreiden sähköisiä ominaisuuksia on vuosien saatossa paranneltu ja nykyään magneettisesta epäsymmetriasta aiheutuvat laakerivirrat koskevat lähinnä suurempitehoisia moottoreita suurien magneettivoiden vuoksi. Laakerivirtaongelmat ovat kuitenkin yleistyneet viime vuosien taajuusmuuttajaohjattujen moottorilähtöjen seurauksena myös pienemmissä moottoreissa; epäsymmetrisen jännitteen takia kytkeytyvät vuotovirrat sekä vaihtosuuntauspiirien transistorien korkeat kytkentätaajuudet aiheuttavat pahimmillaan moninkertaisesti laakerin elinikää lyhentäviä vuotovirtoja. (Muetze 2004, 3.)

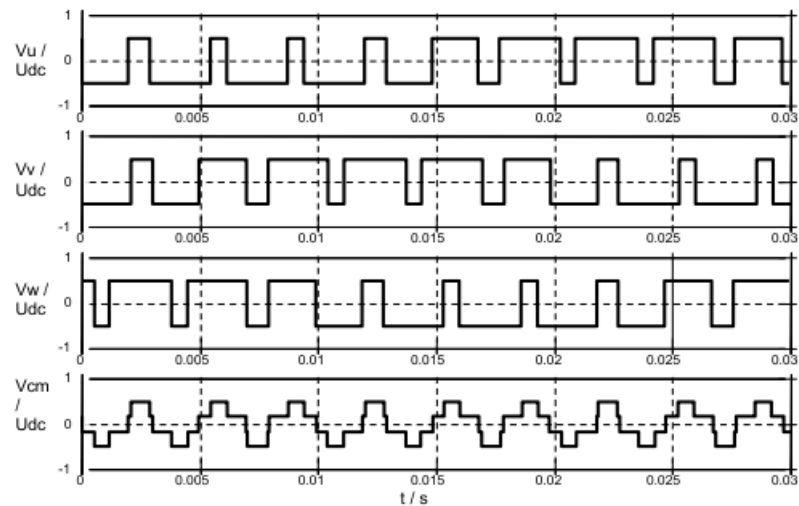
## 2.2 Yhteismuotoinen jännite

Verkkoon liitetyn symmetrisen kolmivaihekuorman jännitteet ja virrat summautuvat jokaisella ajanhetkellä nolllaksi. Tästä syystä symmetrisellä kuormalla ei synny nolllajohtimeen virtaa eikä piiri näin ollen vaadi nolllajohdinta. Kuviossa yksi esitetyillä tehollisarvo-osoittimilla on symmetrisessä järjestelmässä jokaisen vaiheen välillä yhtä suuri itseisarvo ja kulmaero. (Ahoranta 2008, 309.)



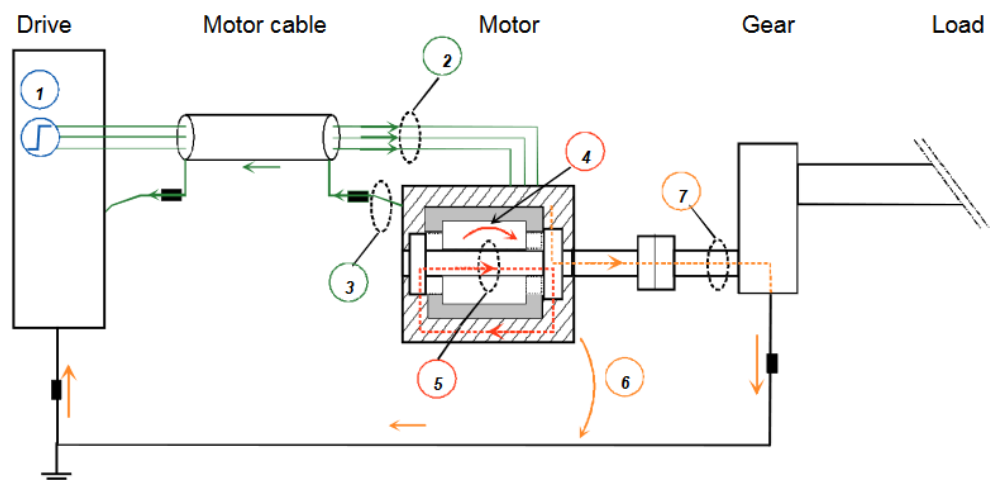
Kuvio 1. Kolmen vaiheen väliset jännite- ja virtaosoittimet (Ahoranta 2008, 310)

Taajuusmuuttajalla ohjatussa piirissä vaihejännitteet eivät kuitenkaan summaudu nolllaksi. Vaikka syötettävä kuorma (moottori) olisikin jokaisen vaiheen väliltä yhtä suuri impedanssiltaan eli olisi kuormana symmetrinen, jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan vaihtosuuntauksella on mahdotonta tuottaa tasajännitteestä täysin symmetristä sinimuotoista kolmivaihejännitettä. Jokaisella ajanhetkellä taajuusmuuttajan syöttämässä piirissä syntyy siis arvoltaan vaihteleva pieni "erojännite", jonka arvo on suurempi kuin nolla volttia, kuten esitettyinä kuviossa kaksi. Tätä jännitettä nimitetään yhteismuotoiseksi jännitteeksi. (ABB 2000, 7.)



Kuvio 2. Taajuusmuuttajan vaiheiden summan ajan hetkellä  $t$  tuottama jännite  $V_{cm}$  (PSK 7708 2004, 5)

Yhteismuotoinen jännite muodostaa hajakapasitanssien kautta jännitteeseen ja kapasitiiviseen reaktanssiin verrannollisen virran, joka kulkee takaisin syöttävään taajuusmuuttajaan joko kaapelia (kulkureittinä vaippa tai maadoitusjohdin) tai muuntajan maapisteesen tehtaan maadoitusverkkoa pitkin, kun kyseessä ei ole kelluva verkko, luoden virtapiirin (ks. kuvio 3). Tämän piirin virtaa kutsutaan yhteismuotoiseksi virraksi. (ABB 2000, 7.)

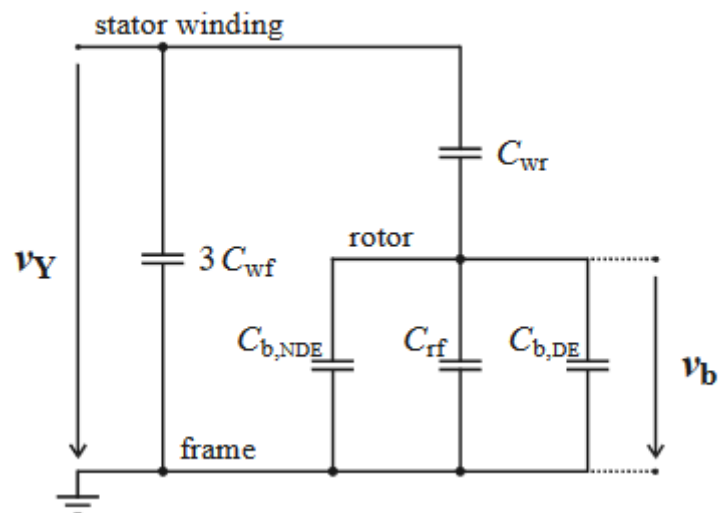


Kuvio 3. Kiertävän virran ja akselin maadoitusvirran muodostuminen sekä kulkureitti vaipan ja kuorman maapisteen kautta takaisin taajuusmuuttajalle (Grounding and cabling of drive systems 2013, 12)

## 2.3 Kytkeytyminen

Häiriöiden kytkeytyminen voidaan jakaa kahteen kytkeytymistyyppiin; yhteismuotoiseen, jossa häiriövirta liikkuu vaiheesta maahan ja eromuotoiseen, jossa häiriövirta kytkeytyy vaiheiden välillä. Näistä yhteismuotoinen kytkeytyminen on tekijänä moottorin laakerivirtojen synnyssä maahan vuotavasta virrasta johtuen. (Chen & Lipo 1998, 34.)

Kaksi toisistaan eristettyä johtavasta materiaalista valmistettua osaa ovat kytkeytyneet toisiinsa kapasitiivisesti (ABB 2000, 9). Kuviossa neljä esitettyä moottorissa luonnostaan esiintyvää, hajakapasitanssiksi kutsuttua kapasitanssia moottorin eri pisteissä. (Chen & Lipo 1998, 32.)



Kuvio 4. Moottorissa esiintyvien hajakapasitanssien ekvivalenttipiiri (Muetze 2004, 9)

$C_{wf}$  = staattorin ja rungon välinen hajakapasitanssi

$C_{ph}$  = vaiheiden välinen hajakapasitanssi

$C_{wr}$  = staattorin ja roottorin välinen hajakapasitanssi

$C_{rf}$  = roottorin ja rungon välinen hajakapasitanssi

$C_b$  = laakerin yli vaikuttava hajakapasitanssi

Moottorin kytkentäpisteeseen vaikuttava korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite  $v_Y$  näkyy tämän jännitteenjakopiirin läpi laakerin yli vaikuttavana jännitteenä  $v_b$ . (Muetze 2004, 9.)

Pienillä taajuuksilla näistä hajakapasitansseista ei niiden pienen kapasitanssiarvon vuoksi ole juurikaan haittaa. Taajuusmuuttajan korkeiden kytkentätaajuuksien vuoksi hajakapasitanssit ovat kuitenkin ongelmallisia, sillä korkeilla kytkentätaajuuksilla myös yhteismuotoinen jännite on korkeataajuista (ABB 2000, 9). Kapasitiivisen reaktanssin yhtälöllä 1 voidaan havainnoida taajuuden vaikutusta:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1)$$

missä  $X_C$  = kapasitiivinen reaktanssi

$f$  = taajuus

$C$  = kapasitanssi

Taajuuden kasvaessa kapasitiivisen reaktanssin arvo pienenee pienentäen piirin kokonaisimpedanssia ja luoden pieni-impedanssisen kulkureitin virralle.

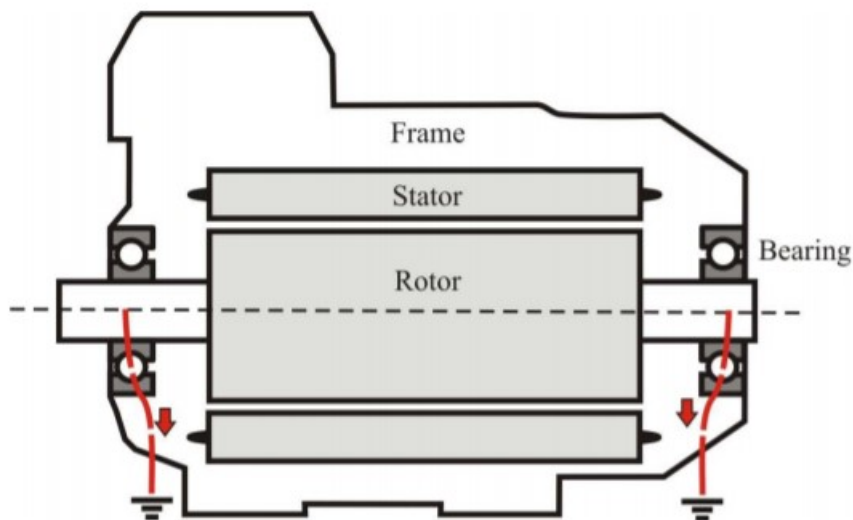
## 2.4 Virtojen kiertoreitit moottorissa

Kuten edellä todettu, laakerivirrat syntyvät korkeataajuisen yhteismuotoisen jännitteen seurauksena. Vaikuttaessaan laakerin yli jännite muodostaa haitallisen virtapiirin. Laakerivirrat voidaan erotella syntymekaniikan ja kiertoreitin perusteella kolmeen eri ryhmään: kapasitiivisiin purkausvirtoihin, akselin maadoitusvirtaan ja kiertovirtaan. Virran suuruuteen ja moottorissa kiertämään reittiin vaikuttaa moottorin koko, maadoitus/häiriösuojaus sekä akselin maadoitustapa (ABB 2000, 7). Edellä mainittujen virtamuotojen lisäksi moottorissa saattaa ilmetä IGB-transistorien nopeista kytkentätaajuuksista johtuvia pieniä, 5-10 mA:n kapasitiivisia laakerivirtoja (Muetze

2004, 10). Näihin ei kuitenkaan keskitytä tässä työssä niiden vähäisen haitallisuuden vuoksi.

#### 2.4.1 Kapasitiivinen purkausvirta

Kapasitiivisessa purkausvirrassa yhteismuotoinen jännite kytkeytyy moottorin hajakapasitanssien kautta akselille. Akselin ja rungon välille muodostuu jännite-ero (ABB 2000, 6) ja laakerin ja voitelukalvon väliseen ilmvälikapasitanssiin varautuu energiaa, joka purkautuu laakerin läpi voitelukalvon läpilyöntijännitteen ylittyessä. Alhaisilla pyörimisnopeuksilla laakerilla on suora kosketuskontakti laakerin sisäkehän kanssa ja ilmväliin syntyvä kondensaattori on oikosuljettu, joten ongelma ilmenee vasta moottorin saavuttaessa tarpeeksi suuren pyörimisnopeuden (Chen, Fitzgerald & Lipo 1996, 30). Virran kulkureitti esitetty alla olevassa kuviossa viisi.

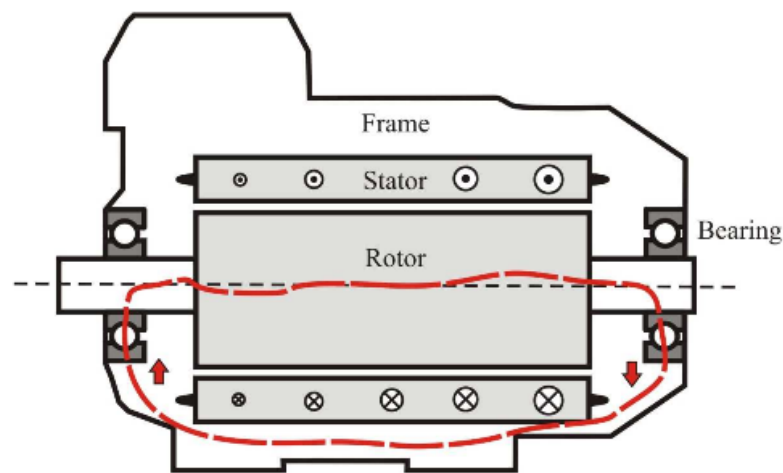


Kuvio 5. Kapasitiivisen virran kulkusuunta moottorissa (Särkimäki 2009, 19)

Jos läpilyövällä virtapulsseilla on tarpeeksi suuri energia, saattaa laakerista ja laakerin kehistä irrota metallia voiteluaineeseen. Tätä ilmiötä kutsutaan kipinätyöstöksi. Kipinätyöstöstä aiheutuvat voiteluaineen metallihiukkaset ja kuopat laakerin kehillä keräävät helpommin virtapulsseja ja kiihdyttävät laakerivirtaongelmaa (ABB 2000, 6.)

### 2.4.2 Kiertovirta

Staattorin käämityksistä kytkeytyy moottorin runkoon ja staattoripakettiin suuritaajuinen yhteismuotoinen virta staattorikäämityksen ja staattoripaketin välisen hajakapasitanssin kautta. Virran takia staattoriselkään muodostuu lineaarisesti pienenevä magneettivuo, jonka suuruus muuttuu aksiaalisesti laminoinnin vuoksi. Magneettivuo indusoi akselin päiden välille käyrämuodoltaan yhteismuotoista virtaa vastaavan jännitteen. Jos jännite akselilla nousee tarpeeksi suureksi, laakerin öljypinnan läpilyöntilujuus ylittyy ja muodostuu virtapiiri kuvion viisi mukaan eri potentiaalissa olevien akselien päiden välille laakereiden ja rungon kautta. (Särkimäki 2009, 20.)

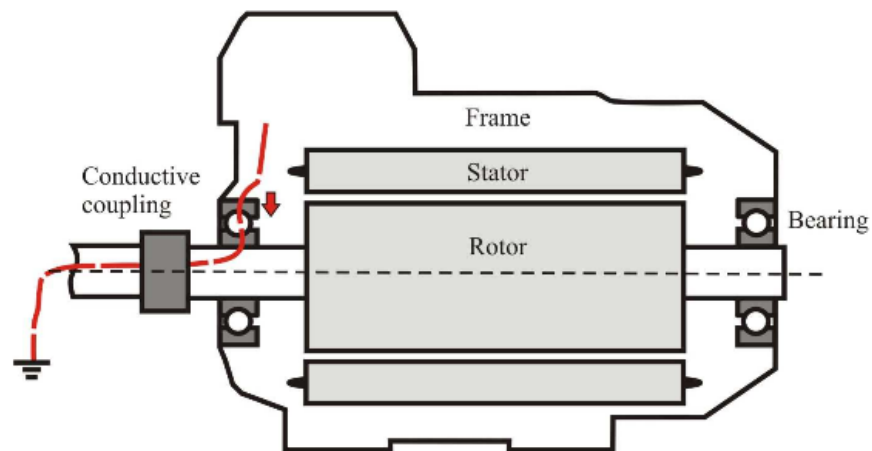


Kuvio 6. Kiertovirran reitti moottorissa (Särkimäki 2009, 21)

### 2.4.3 Akselin maadoitusvirta

Yhteismuotoinen jännite muodostaa suuritaajuisen virran moottorin runkoon. Tämä suuritaajuinen virta aiheuttaa paluumaadoitusten impedanssien vuoksi maadoituksissa jännitehäviöitä, jotka näkyvät jännitteen nousuna lähteen maatasoon verrattuna (ABB 2000, 7). Jos moottorin runkoa ei ole kunnollisesti maadoitettu, saattaa virran runkoon aiheuttama jännite muodostua tarpeeksi suureksi ylittääkseen laakerin läpilyöntikestoisuuden ja muodostaa kulkureitin rungosta laakerien läpi akselille ja työkoneneen tai kytkimen maapisteeseen kuvion 7 tavoin. (Särkimäki 2009, 21).

Maapisteen kautta virta muodostaa virtapiirin aina taajuusmuuttajan maahan asti.  
(ABB 2000, 10.)



Kuvio 7. Akselin maadoitusvirran kulkureitti rungon ja akselin kautta maapisteeseen  
(Särkimäki 2009, 22)

### 3 Laakerivirtojen rajoitusmenetelmät

Laakerivirtoja ei välttämättä kyetä poistamaan kokonaan moottoripiiristä, mutta virtaa voidaan eri menetelmillä rajoittaa laakerille haitallisia raja-arvoja pienemmäksi.

#### 3.1 Oikeaoppiset asennustavat

Taajuusmuuttajakäyttöisissä moottorilähdöissä oikeaoppiset asennustavat sekä oikeanlaiset asennustarvikkeet toimivat tehokkaana tapana vähentää laakerivirtaongelmia. (ABB 2000, 15.)

##### 3.1.1 Symmetriset kaapelit

Moottorilähtöä syöttävien monijohdinkaapelien on oltava symmetrisiä. Jotta kyettäisiin välttämään maadoitusjohtimeen indusoituvat virrat, on kaapelin maadoitusjohtimen oltava joko syöttäviä vaihteita ympäröivä tai kaapelin sisäisen rakenteen oltava symmetrinen sijoittamalla maadoitus kolmena erillisenä johtimena kolmen vaiheen



kanssa (ABB 2000, 15). Taajuusmuuttajälähdöissä tulee välttää epäsymmetrisiä neljänapaisten kaapeleiden käyttöä. (Grounding and cabling of drive systems 2013, 28.)

### 3.1.2 Häiriösuojattu kaapeli

Moottoria syöttävän kaapelin tulee olla häiriösuojattua. Toimivin EMC-suojaus saadaan toteutettua asentamalla kaapelin vaippa aina moottorin kytkentäkopasta ja mahdollisista turvakytkimistä tai kytkentäkotelosta taajuusmuuttajalle asti 360 asteen liitoksella. (ABB 2000, 16.)

Oikein toteutettu ja toimiva häiriösuojaus muodostaa imuvirtamuuntajan ja häiriövirralla on pieni-impedanssinen kulkureitti takaisin taajuusmuuttajalle. (Kanninen 2011, 33.)

### 3.1.3 Suuritaajuiset potentiaalintasauskytkennät

Korkealla taajuudella esiintyy kaapeleissa niin sanottu virranahtoilmiö eli skin-effekti. Pyöreillä kaapeleilla korkeataajuisella virralla elektronit pakkautuvat kaapelin ulkoreunalle, eikä kaapelissa kulkeva virta hyödynnä koko mahdollista poikkipinta-alaa (Ylijännite- ja häiriösuojaus 2000, 43). Lisäksi induktiivinen reaktanssi kasvaa suhteessa taajuuteen yhtälön 2 osoittamalla tavalla:

$$X_L = 2\pi fL. \quad (2)$$

missä  $X_L$  = induktiivinen reaktanssi

$f$  = taajuus

$L$  = induktanssi

Tämä nostaa kaapelin kokonaisimpedanssia, joten häiriövirtojen maadoittamisessa on suositeltavaa käyttää korkeataajuiselle virralla suunniteltua kaapelia. Moottorin ja taajuusmuuttajan tulee olla samassa maatasossa, ja jos on aihetta epäillä tämän toteutumista, voidaan esimerkiksi moottorin runkoon toteuttaa lisämaadoituksia.

Samalla tavalla voi olla hyödyllistä oikosulkea moottorin ja kytkimen/työkoneen välit kuparipunoksella ja estää eri maatasojen väliset potentiaalierot. (ABB 2000, 17.)

### 3.2 Muita toimenpiteitä

Aiemmissa kappaleissa mainittujen toimenpiteiden lisäksi laakerivirtaongelmia voidaan vähentää muilla keinoin ja havaittaessa laakerivirtoja esimerkiksi asennuksen jälkeen. Oheisessa taulukossa (ks. taulukko 1) esitettyinä muutamia korjaavia toimenpiteitä.

Taulukko 1. Virran tyyppi ja korjaavien toimenpiteiden vaikutus (Särkimäki 2009, 33, muokattu)

<b>Virran tyyppi</b> <b>Korjaustapa</b>	<b>Kapasitiivinen vuotovirta</b>	<b>Kiertävä virta</b>	<b>Akselin maadoitusvirta</b>
<b>Maadoitusharja/-hiili</b>	Hyvä jos matala impedanssi	Hyvä jos matala impedanssi	Saattaa pahentaa ongelmaa
<b>Hybridilaakerit</b>	Hyvä. Vaatii molempiin päihin eristetyt laakerit	Hyvä. Vaatii ainakin toiseen päähän eristetyt laakerit	Hyvä. Vaatii molempiin päihin eristetyt laakerit
<b>Maadoituksen parantaminen/EMC-suojatut kaapelit</b>	Ei toimi	Ei suurempaa vaikutusta. Saattaa pahentaa ongelmaa	Hyvä
<b>Suotimet</b>	Toimii jos vähentää yhteismuotoista jännitettä	Hyvä	Hyvä
<b>Eristetty kytkin</b>	Ei toimi, saattaa siirtää ongelman työkoneen laakereista moottorin laakereihin	Ei toimi	Hyvä

<b>Taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden laskeminen</b>	Saattaa vähentää laakerivirtoja	Saattaa vähentää laakerivirtoja	Saattaa vähentää laakerivirtoja
<b>Yhteismuotoista jännitettä laskeva moduloititapa</b>	Toimiva jos vähentää yhteismuotoista jännitettä	Toimiva jos vähentää yhteismuotoista jännitettä	Toimiva jos vähentää yhteismuotoista jännitettä
<b>Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan vaihto virtavälipiirilliseen</b>	Ei toimi	Saattaa vähentää laakerivirtoja	Saattaa vähentää laakerivirtoja

Korjaustoimenpiteet laakerivirtojen vähentämiseksi saattavat aiheuttaa toistuvasti ilmeneviä kustannuksia lisäten moottorilähdön todellista kokonaishintaa sekä lisäten kunnossapidollista taakkaa. Nykyiset mikrokuitua hyödyntävät maadoitusrenkaat, hybridilaakerit ja suotimet ovat kuitenkin passiivisia ja huoltovapaita komponentteja ja eivätkä tuota erillisiä lisäkustannuksia pitkällä aikavälillä.

Maadoitusharja on tehokas tapa vähentää moottorin kapasitiivisia virtoja. Maadoitusrenkas asennetaan akselin ympäri ja maadoitetaan. Näin akselille ei pääse muodostumaan läpilyöntiin vaadittavaa jännitettä eikä laakereiden läpi kulje virtaa. (Särkimäki 2009, 29.)

Hybridilaakerit asennetaan yleensä moottorin N-päähän, sillä moottorin D-päässä laakerit ovat vaikeammat vaihtaa ja kiertävä virta voidaan katkaista jo toisen pään eristetyillä laakereilla. Kokonaan eristävästä materiaalista tehdyt laakerit ovat yleinen ja erittäin tehokas keino kiertovirran katkaisemiseksi moottorista. Hybridilaakereiden lisäksi vaihtoehtona on eristävällä aineella pinnoitetut laakerit. Pinnoitetuilla laakereilla on kuitenkin tietty läpilyöntilujuus laakerin saamasta kontaktista ja eristemateriaalin paksuudesta riippuen ja toisin kuin hybridilaakerit, eivät välttämättä suojaa moottoria täydellisesti laakerivirtaongelmilta. (Särkimäki 2009, 29.)

Taajuusmuuttajälähtöihin esimerkiksi ABB toimittaa joko tehdas- tai jälkiasennettuna  $dU/dt$ -ja common mode- suotimia (ABB 2015). Akselin maadoitusvirtoja ja kiertovirtoja saadaan vähennettyä jännitteen nousunopeuteen vaikuttavalla  $dU/dt$ -suotimella. Kapasitiivisia purkausvirtoja voidaan vähentää käyttämällä yhteismuotoista jännitettä pienentävää common mode-suodinta. (Särkimäki 2009, 30.)

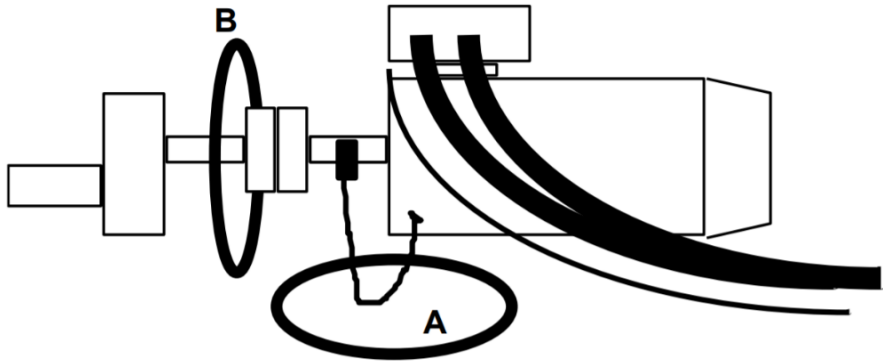
## 4 Laakerivirtojen mittaaminen

### 4.1.1 Akselin maadoitusvirran ja kiertovirran mittaaminen

Virtojen mittauksesta tekee mutkikasta se, ettei laakerin läpi kulkevaa virtaa kyetä kenttäolosuhteissa käytännössä mitenkään mittaamaan suoraan. Mittauksia varten virralle luodaan välillinen pieni-impedanssinen kulkureitti, jota mittaamalla virran suuruudesta ja haitallisuudesta laakereille saadaan jonkinasteinen arvio. (PSK 7708 2004, 5.)

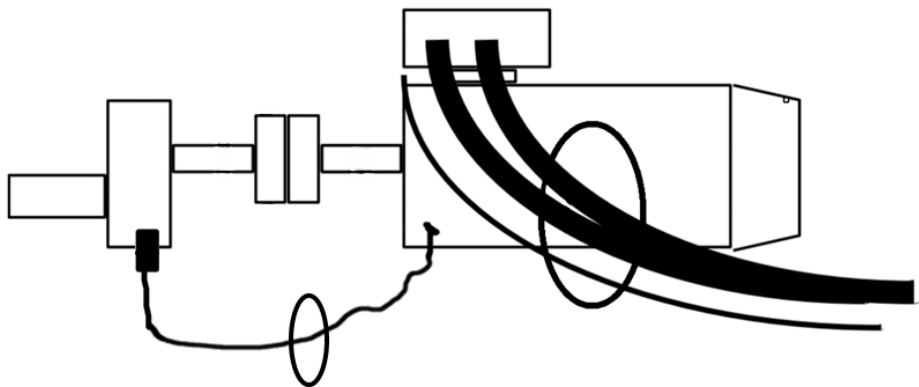
Kiertovirtaa mitataan oikosulkemalla akseli moottorin runkoon ja ohittamalla valitun pään laakeri. Akselille kontakti luodaan esimerkiksi hiiliharjan avulla, johon on kiinnitetty kuparipunoskaapeli. Kaapelin toinen pää kiinnitetään runkoon. Tästä oikosulkulenkestä mitataan virta virtalenkillä. (PSK 7708 2004, 7.)

Akselin maadoitusvirran mittauksessa virtalenkki asetetaan akselin ympärille ja virta mitataan suoraan pyörivältä akselilta (ks. kuvio 8). Turvallisuuden vuoksi lenkki on aina laitettava kytkinsuojan eikä paljaan akselin ympäri. (PSK 7708 2004, 8.)



Kuvio 8. Akselin maadoitusvirran (B) ja kiertävän virran (A) mittaaminen (PSK 7708 2004, 7)

Lisäksi moottorilta voidaan mitata summavirta ja rungon erillismaadoituksen virtaa. Summavirtamittauksen avulla nähdään suoraan kaapelin vaippaa tai maadoitusta pitkin takaisin taajuusmuuttajalle palaamatta jäävän virran suuruus (PSK 7708 2004, 8). Suurikokoinen summavirta saattaa kertoa puutteista kaapelin suojavaipan ja taajuusmuuttajan välillä. Tarvittaessa moottorin ja kytkimen tai työkoneen välille voidaan luoda oikosulkemalla tai lisämaadoituksia toteuttamalla eri mittauskytkentöjä virran kulkureitin selvittämiseksi (ks. kuvio 9) ja mahdollisten korjaavien toimenpiteiden vaikutuksesta virran suuruuteen.



Kuvio 9. Summavirran ja moottorin rungon ja kytkimen välillä olevan oikosulkulenkin mittaaminen (PSK 7708 2004, 7, muokattu)

#### 4.1.2 Kapasitiivisten virtojen mittaaminen

Kapasitiivisia purkausvirtoja ei kyetä kenttäolosuhteissa mittaamaan kuin välillisesti jännitteen kautta. Akselikontakti luodaan esimerkiksi hiiltä käyttämällä ja akselin ja moottorin rungon väliltä mitataan jännite. Piirin impedanssiin vaikuttaa kuitenkin monta eri tekijää eikä jännitteen arvon tipahtamisen suuruusluokka anna kuin hyvin epämääräisen arvion mahdollisen virran suuruudesta. (PSK 7708 2004, 8.)

## 5 Mittausten toteutus

Mittauksia varten tuli toteuttaa erinäisiä laitehankintoja. Hankintojen lisäksi tuli päättää, millä perusteella moottorit valikoidaan mittauksiin ja tutustua näiden asennustapoihin, maadoitusten toteutukseen ja yleiseen sijaintiin.

### 5.1 Tarvehankinnat

Virran huippuarvot itsessään eivät välttämättä kerro laakerivirran todellisesta haitallisuudesta ja laakereiden ennen aikaista kulumista aiheuttavasta ongelmasta. Tehdasalueella sijaitsevat oskilloskoopit olivat vanhahkoja eikä niistä löytynyt tehollisarvon mittaukseen vaadittavaa laskentakykyä. RMS-arvo kyettäisiin lukemaan kelojen integraattoreiden ulostulopuolelta myös yleismittarilla, mutta yleisen käytettävyyden vuoksi uusi oskilloskooppi nähtiin parempana ratkaisuna. Uudelle oskilloskoopille löytyi muutakin käyttöä alueella, joten tehtaalle tilattiin kannettava Rohde&Schwarzin Scope Rider-oskilloskooppi ja muuta käyttöä varten väylädekooderi.

#### 5.1.1 Oskilloskooppi

Yksi oskilloskoopilta vaadittavia ominaisuuksia oli helppo liikuteltavuus sekä jonkinasteinen suojaus. Kentällä mukana liikuteltavan laitteen on kestettävä siihen kohdistuvat ulkoiset rasitteet, kuten pöly ja ilmankosteus. Hankitusta oskilloskoopista löytyy myös logger-toiminto. Logger-tilassa oskilloskooppi tallentaa muistikortille tai USB-

tikulle mittauksista valittuja arvoja ja huippu- ja RMS-arvojen tallentaminen käy helposti. Saadut mittaustiedot saadaan tallennettua Excelillä avattavassa muodossa.

Korkeataajuuksista komponenttia mittaavan instrumentin näytteenottotaajuuden on oltava vähintään kaksinkertainen mitattavaan signaaliin verrattuna. Tämän rajataajuuden käyttämisen sijaan käytetään kuitenkin yleensä kertoimena 5-10 (Signaalin näytteenotto N.d). Opinnäytetyöhön liittyvissä mittauksissa taajuusaluetta rajoittaa mittakelat. Riittävän näytteenottotaajuuden lisäksi valittavassa oskilloskoopissa on oltava riittävän suuri muisti.

### 5.1.2 Mittakelat

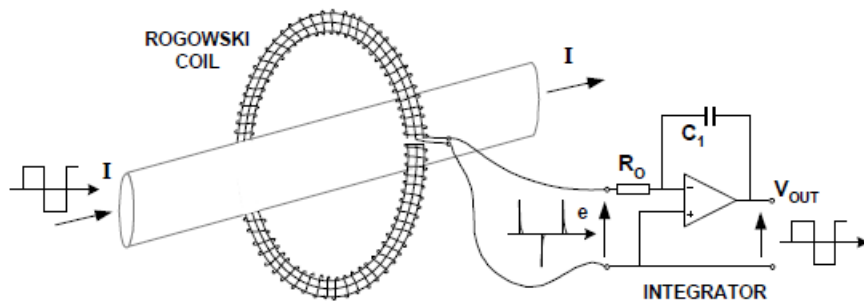
Virranmittausta varten tilattiin Power Electronics Measurement-yritykseltä kaksi CMC015- mallin Rogowski-virranmittauskela, ympärysmitoiltaan 300mm ja 1500mm. Lämpimitaltaan suurempaa kelaä käytetään suoraan akselin läpi kulkevaa virtaa tai summavirtaa mitattaessa ja pienempää virtalenkkiä on helpompi käyttää esimerkiksi johtimien ja maadoituskaapeleiden mittaamiseen.

Rogowski-tyyppiset kelat sopivat erinomaisesti laakerivirtojen mittaukseen. Kelalla kyetään mittaamaan kelan omia nimellisvirtoja suurempia virta-arvoja virtalenkin kylästäymättä ja vahingoittumatta ja laajan taajuuskaistan takia kyetään todentamaan suuritaajuiset laakerivirrat. Mittauksiin valitun CMC015-mallin kelan vaimentamattomalla taajuudella integraattorin ulostulojännite on 200 millivolttia yhtä ampeeria kohti (ks. kuvio 10). Taajuuskaistan ulkopuoliset virrat vaimennetaan häiriöiden suodattamiseksi. (Application notes 2002, 4.)

Model	Sensitivity (mV/A)	Peak current (A)	Noise max (mVp-p)	LF (-3dB) bandwidth (kHz)	Typical LF (<1%) bandwidth (kHz)	Peak di/dt (kA/μs)	HF (-3dB) bandwidth (MHz) Coil length 1000mm
CMC015	200.0	37.5	4.0	19.0	50.0	4.0	11.0
CMC03	100.0	75.0	4.0	6.0	15.0	8.0	13.0
CMC06	50.0	150.0	4.0	1.9	5.0	16.0	14.0

Kuvio 10. Yhteismuotoisen virran mittaamiseen tarkoitettujen kelojen toimintaraja-arvoja (Rogowski probe for measuring hf common mode currents in VSDs 2018, 2)

Keloja käytetään kiinteästi kelaan kiinnitetyn integraattoriyksikön kanssa. Kelaan indusoituu mitattavan kappaleen virran muutosnopeuteen verrannollinen jännite. Tästä syystä integraattori on oleellinen osa kelaä, virran todellisen muodon saamiseksi oskilloskoopille syötetty jännite täytyy muuntaa vastaamaan todellista mitattua virtaa, kuten esitettyä kuviossa 11. (Application notes 2002, 2.)



Kuvio 11. Rogowski-kelan ja integraattoriyksikön toimintaperiaate (Application notes 2002, 2)

### 5.1.3 Muut tarvehankinnat

Hiilen telinettä varten tilattiin alumiiniprofiilia sekä säädettäviä kulmia. Telineeseen tilattiin 1500N magneetit päälle-pois kytkimillä. Magneettien avulla pitimen siirtely on helppoa ja teline on nopea asentaa moottorin kopan päälle tai esimerkiksi moottorin pedille. Tehdasalueella sijaitsee pieni turbiini, joten generaattorin magnetointia varten käytettäviä hiiliä löytyi varastosta. Hiilen pidike ja hiili eristettiin pleksillä alumiiniprofiilista.

Mittauksia varten tilattiin myös lattamaista kuparipunosta alueella sähkötöitä tekevän asennusyrityksen kautta. Kaapeleiden avulla voidaan toteuttaa eri mittakytkentöjä pisteiden välillä ja "haarukoida" tarkemmin virran kulkureittejä. Kaapeleita tilattiin kahta eri pituutta, jotta moottorin sijainnista ja tehtävästä mittauskytkennästä riippuen niiden käyttö olisi helpompaa. Leveämmällä ja neliöllisesti isommalla kaapelilla olisi ollut pitkä toimitusaika ja melko huono saatavuus, joten neliöllisyyttä lisättiin tilattuihin kaapeleihin kiinnittämällä ne yhteen vulkanoidulla teipillä ja tinaamalla



pää yhteen. Kaapelit suojattiin niin sanotulla haitariputkella, hiileen kiinnitettävä puunos suojattiin kutistesukalla. Kaapeleiden nopeaa kentällä kytkemistä varten tilattiin kolme ruuvattavaa maadoituspuristinta, joka kiinnitettiin kaapeleihin. Puristimella kaapeli on helppoa kiinnittää tarvittaessa esimerkiksi moottorin ja työkoneneen rungon välille.

## 5.2 Mitattavien moottoreiden valinta

Laakerivirtaongelmiin puututtiin tietystä runkokoosta ylöspäin olevien moottoreiden kohdalla jo uuden tehtaan rakennusvaiheessa ja näihin asennettiin ennen käyttöönottoa N-päähän eristävällä pinnalla varustetut laakerit. Kunnonvalvonnassa on kuitenkin ollut epäilystä vuotovirroista johtuvista vikaantumisista. Näin ollen laakerivirroista kärsivien moottorien kartoittamiseen nähtiin tehokkaimpana keinona toteuttaa laajat värähtelymittaukset suuren runkokoon moottoreille ja seuloa tuloksista tarkempaan laakerivirtamittaukseen valittavat koneet. Mukaan oli tarkoitus valita myös kooltaan pienempiä, järjestelmässä kriittisyysluokituksessa korkealla olevia moottoreita. Värähtelymittauksia ei kuitenkaan saatu syksyn aikana aikataulutettua opinnäytetyön ajoitukselle sopivaksi. Mittauksiin valittiin tästä syystä tyhjiöpumppujen moottoreita, joissa on ollut aiempaa epäilystä laakerivirtaviasta. Tarkoituksena oli myös mitata kuivainkaapin puhallinmoottoreita mutta myös tämä jäi aikataulutuksen vuoksi pois opinnäytetyöstä.

Vaikka laakerivirrat ovatkin yleisesti tiedostettu taajuusmuuttajälähtöjen viaksi, on alueelta aiemminkin todennettu pienjännitepuolelta puuttuvan suodatuksen ja runsaan sähkön laatua heikentävän ja korkeataajuista virtakomponenttia aiheuttavan taajuusmuuttajakuorman vuoksi laakerivirtaongelmia suorista lähdoistä. Lisäksi suoriin lähtöihin saattaa muodostua magneettisen epäsymmetrian vuoksi kiertävää virtaa. Tästä syystä mittauksiin otettiin mukaan muutama suuritehoisempi suora lähtö.

Alueen sähkösuunnittelun on vastannut Sweco Finland Oy. Mittauksiin valittavien moottorilähtöjen järjestämistä varten yritykseltä kysyttiin alueen moottorilähtöliittaukset, joista oli tarkoitus luoda värähtelymittauksien kautta laakerivirtamittauksiin

valittavat sähkökäytöt sekä suorat lähdöt. Listausta tuli kuitenkin hyödynnettyä myös varsinaisessa lopullisessa mittaustyössä.

### 5.3 Mittausten esivalmistelut

Osa isoista moottoreista tilataan valmiina pakettina kytkimen ja työkoneen kanssa, jolloin ne ovat yhdistettynä metallipedin kautta. Metallipedin puuttuessa maadoitus voidaan toteuttaa suuritaajuismaadoituksena käyttämällä kuparipunoskaapelia moottorin, kytkimen ja työkoneen välillä ja asentamalla moottorin runkoon erillismaadoitus. Metallipedin tarkoituksena on estää akselin maadoitusvirtoja pitämällä kytkin ja työlaite samassa potentiaalissa moottorin runkoon nähden. Kiertovirta saattaa silti muodostua esimerkiksi kytkimen pedin jalan kautta. (ABB 2000, 13.)

Ennen mittauksia kannattaa tutustua mitattavan moottorin kuviin. Näin voidaan saada alustavaa osviittaa vuotovirran tyypistä ja sen aiheuttaneista syistä. Taajuusmuuttajälähdöissä moottorikaapeleiden tulisi olla häiriösuojattuja ja mahdollisen rungon lisämaadoituksen tulee olla neliöllisesti tarpeeksi suuri, jotta rungossa kiertävä virta ei muodosta akselin maadoitusvirtaa. Moottorin arvokilpeen on merkitty käytettyjen laakereiden tyyppi ja esimerkiksi hybridilaakereilla voidaan kiertovirran syntyminen estää kokonaan. Mittauksia tehdessä moottorin layout-kuvaan voi myös merkitä kyseiselle moottorille toteutettuja mittauksia ja saatuja arvoja seurannan ja kokonaiskuvan hahmottamisen helpottamiseksi.

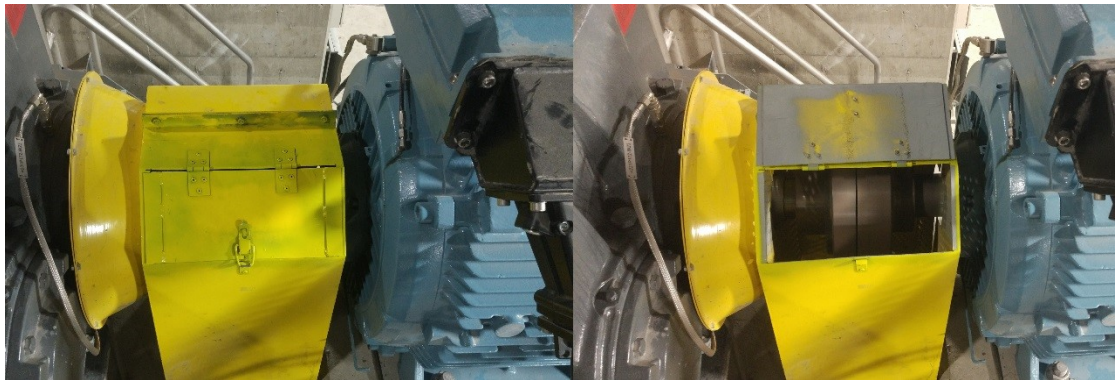
Toteutettavista mittauksista riippuen moottoreiden läheisyydestä kannattaa myös etsiä maadoituspiste, johon moottorin akseliin painettava hiiliharja tai tarvittaessa moottorin runko saadaan luotettavasti maadoitettua. Näin voidaan suoraan havainnoida esimerkiksi maadoitushiilen tai moottorin rungon maadoittamisesta saatavia vaikutuksia moottorissa kulkevaan virtaan.

Pyörivään akseliin hiilen painaminen synnyttää vaaratilanteen. Esivalmisteluilla mahdollista riskiä voidaan kuitenkin pienentää. Tyhjiöpumppumoottoreiden kytkinsuojiiin valmisteltiin seisakin aikana luukut, joista hiilen saa helposti ja turvallisesti aseteltua

akselia vasten. Lisäksi pyörivästä akselistä tarkistetaan stroboskoopilla tai palalla pahlavia tasaisuus ennen hiilen kiinni painamista. (PSK 7708 2004, 8.)

#### 5.4 Tyhjiöpumppumoottorit

Moottoreiden kytkinsuojiiin asennettiin pesuseisakin aikana luukut hiiltä varten (ks. kuvio 12). Kytkinsuojien asentamisen aikana tarkastettiin moottorin akseli kiiloilta ja varmistettiin kohta, johon hiili oli mahdollista ajon aikana painaa turvallisesti.



Kuvio 12. Kytkinsuojaan rakennettu luukku

Tilassa oli neljä eri tyhjiöpumpun moottoria, joista kaksi ovat 315kW:n suoria käytöjä ja kaksi taajuusmuuttajaohjattua, 800kW:n ja 500kW:n moottorit. Suorat käytöt otettiin myös mukaan mittauksiin.

Tilasta löytyi potentiaalintasauskisko, johon moottoreiden runkojen erillismaadoitukset olivat asennettu. Suorissa lähdöissä moottorin, kytkimen ja työkoneen välinen maadoitus oli toteutettu pyörökaapelilla. Taajuusmuuttajakäytöissä oli käytetty latta-mallista korkeataajuusmaadoitusta. Moottorikaapeleina kaikissa moottoreissa oli käytetty MCMK-kaapeleita. Taajuusmuuttajakäytöissä suositellaan käytettäväksi häiriösuojattuja kaapeleita kuten MCCMK:ta rungon tehokkaamman maadoituksen vuoksi. (Grounding and cabling of drive systems 2013, 19.)

Ennen uuden tehtaanosan käyttöönottoa alueella toteutettiin laakerivirtamittauksia. Laakerivirrat ovat yleisiä taajuusmuuttajakäytöissä, joten työhön toteutettavista mittauksista luultavimmin löytyy vuotovirtoja ja saatuja tuloksia on helppo verrata aiemmin saatuihin mittaustuloksiin. Lisäksi virtojen käyrämuodon voi olettaa vastaavan paljolti laakerivirtoja käsittelevissä materiaaleissa olleita esimerkkejä. Ensimmäisiin testimittauksiin valitusta lähdöstä löytyi melko suuria laakerivirtoja, joten kyseinen moottori otettiin vielä erikseen tarkempaan mittaukseen.

#### 5.4.1 Viiran tyhjiöpumppumoottori 231P171

Pumpuille toteutettiin mittauksia kahdessa osassa. Alustavasti mittauksia tehtiin jo marraskuun alussa ja mittauksia täydennettiin myöhemmin toteutetuilla mittaustuloksilla muutaman viikon päästä.

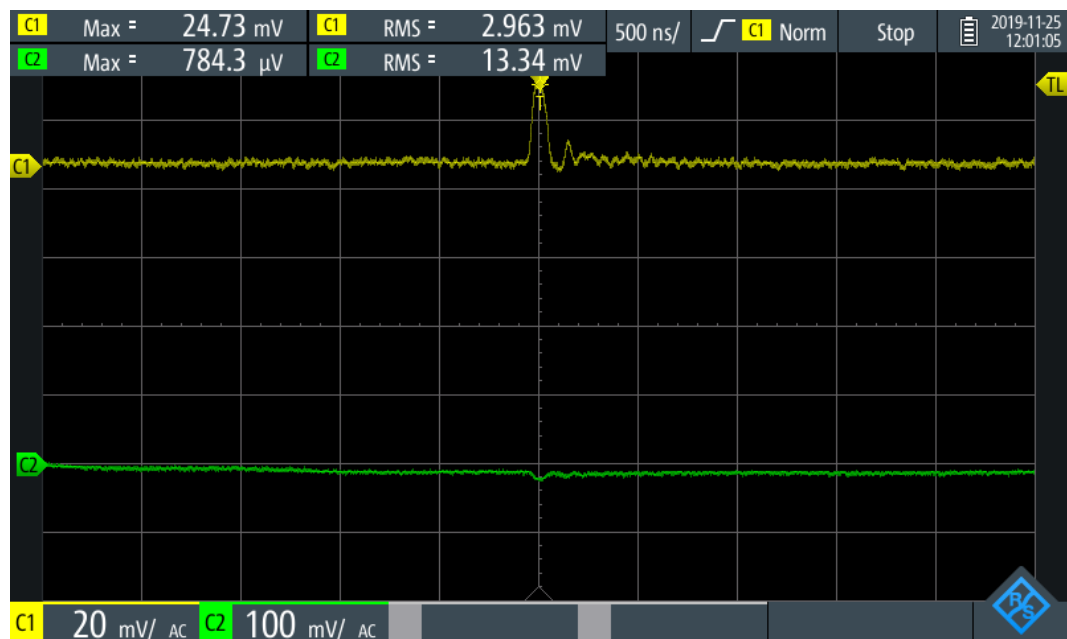
Oskilloskoopin mittapään asetukseksi on mittauksissa asetettu 1:1. Kun tiedetään mittakelojen integraattoreiden syöttävän vaimentamattomalla taajuusalueella 200 mV/A, saadaan todellinen virta-arvo selville jakamalla oskilloskoopin näytöllä näkyvä arvo 200:lla.

Tietyillä mittauskytkennöillä voidaan selvittää esimerkiksi moottorin rungon tai kytkimen/työkoneen maadoituksen tila tai virran kulkureittiä. Arvot näistä kytkennöistä saattavat ylittää standardin viitearvoja mutta eivät aiheuta rasitetta laakereille, joten arvoja ei ole yhtä tärkeää verrata haitallisuusluokitteluihin. Alla olevilla taulukoilla verrataan vain laakerivirtariskistä kertovien kytkentöjen tuloksia. Taulukoissa huippuarvot esitetään ampeereina, tehollisarvot milliampeereina.

Virta-arvojen lisäksi virran taajuusalueeseen kannattaa kiinnittää huomiota. Kiertovirtaa saattaa esiintyä huomattavasti suuremmilla taajuuksilla kuin akselin maadoitusvirtoja. Taajuus näytöltä saadaan laskettua yhden jakson tiedossa ollessa  $F = \frac{1}{\text{Jaksonaika}}$  (Hytönen 2016). Jollei taajuutta tarkasteta käyttämällä oskilloskoopin laskentaominaisuutta, laskemalla saadaan taajuudesta ainakin suuntaa antavia tuloksia.

Oskilloskoopissa hyödynnettiin mittauksissa molempia kanavia. Kun virtalenkit ovat asennettuna paikoilleen, laitetaan integraattoriyksiköstä virta päälle ja käytetään oskilloskoopista löytyvää Autoset-toimintoa kummankin kanavan virtakäyrien sovittamiseksi näytölle. Mittauksesta riippuen säädetään näytöllä näkyvää aika-arvoa oikean taajuusalueen löytämiseksi sekä jännitearvoa ja liipaisintasoja virtakäyrän piirtämiseksi. Liipaisin asetettiin toimimaan normal-toiminnossa, jolloin oikeanlaista virtakäyrää on helpompi lähteä etsimään. Kun virtakäyrä on saatu sovitettua näytölle, voidaan oskilloskoopin logger-toiminnolla alkaa tarvittaessa tallentamaan mittausarvoja.

800 kW:n viiran tyhjiöpumppumoottorin laakerivirtoja lähdettiin kartoittamaan suoraan akselin läpi kulkevan maadoitusvirran mittaamisella sekä moottorin rungon ja kytkimen välisen maadoituskaapelin mittauksella. Maadoitusta pitkin kulkeva virta ei ole moottorille haitallista mutta sen mittaaminen antaa parempaa kokonaiskuvaa rungon maadoituksen toimivuudesta. Suoraan akselilta mitattu virta oli huomattavasti suuremmalla taajuusalueella kuin maadoituskaapelin kautta kulkeva virta. Huippuarvoja akselilta saatiin megahertsien taajuusalueelta, maadoituskaapelilla taas joidenkin kymmenien kilohertsien taajuudelta (ks. kuvio 13).



Kuvio 13. Suoraan akselin läpi kulkevaa virtaa mittaava virtalenkki kanavalla 1, moottorin rungon ja kytkimen välistä maadoitusta mittaava virtalenkki kanavalla 2

Samalla taajuusalueella huomataan tapahtuvan pieni muutos virrassa moottorin rungon ja kytkimen välisessä maadoituskaapelissa. Oskilloskoopin aika-arvoa muuttamalla saadaan rungon ja kytkimen välinen virta paremmin näkyviin. Rungon ja kytkimen välillä kulkevan virta muistuttaa muodoltaan tyyppillistä yhteismuotoista virtaa, joka moottorin rungossa saattaa kulkea (ks. kuvio 14).



Kuvio 14. Akselin läpi kulkevaa virtaa mittaava virtalenkki kanavalla 1. Moottorin rungon ja kytkimen välistä maadoitusta mittaava virtalenkki kanavalla 2

Suoraan akselin läpi kulkeva virta saattaa kertoa moottorin laakereihin vaikuttavista laakerivirroista, joten arvot kirjataan ylös ja vertaillaan PSK:n standardiin (ks. taulukko 2).

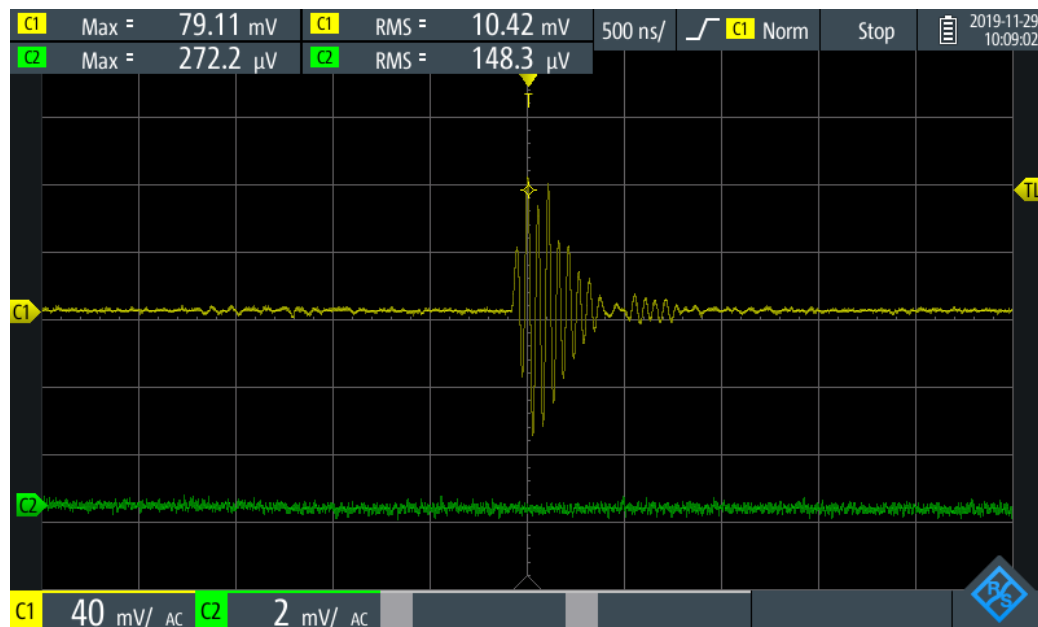
Taulukko 2. Akselin läpi kulkevan virran suuruuden vertailu standardin raja-arvoihin (PSK 2004, 11)

	Mittauskytkentä	Standardin raja-arvot
	Virtalenkki akselilla	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>	<b>0,125</b>	<1 A
		1...2 A
		>2 A
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>		
	<b>14,8</b>	<20 mA
		20...50 mA
		>50 mA

Rungon potentiaalinen nousu suhteessa taajuusmuuttajan maapotentiaalinen saattaa kertoa akselin maadoitusvirroista. Tämän selvittämiseksi tehtiin jännitemittaus tilassa olevan potentiaalintasauskiskon ja moottorin rungon väliltä. Tasa- ja vaihtojännitteiden huippuarvot olivat muutamien satojen millivolttien luokkaa. Pahimmillaan akselin maadoitusvirrasta kärsivässä moottorissa moottorin rungon jännite saattaa nousta jopa yli sadan voltin. (ABB 2000, 10.)

Rungon maadoituksen toimivuutta tarkasteltiin myös kiinnittämällä moottorin rungosta lisämaadoitus tilassa olevaan potentiaalintasauskiskoon ja mittaamalla mahdollisia muutoksia akselin ympärillä olevan virtalenkin virrassa. Jos moottori kärsii akselin maadoitusvirrasta, lisämaadoituksella akselia pitkin kulkevan virran arvo muuttuisi.

Maadoittamalla runko ja toistamalla mittaus huomataan virran suuruuden kasvaneen huomattavasti (ks. kuvio 15). Ilmiö saattaa johtua moottorissa olevasta kiertovirrasta, jota rungon lisämaadoittaminen pahentaa huomattavasti.



Kuvio 15. Akselin läpi kulkevan virran muutos rungon maadoittamisen jälkeen. Kanavalla 2 ei mittausta

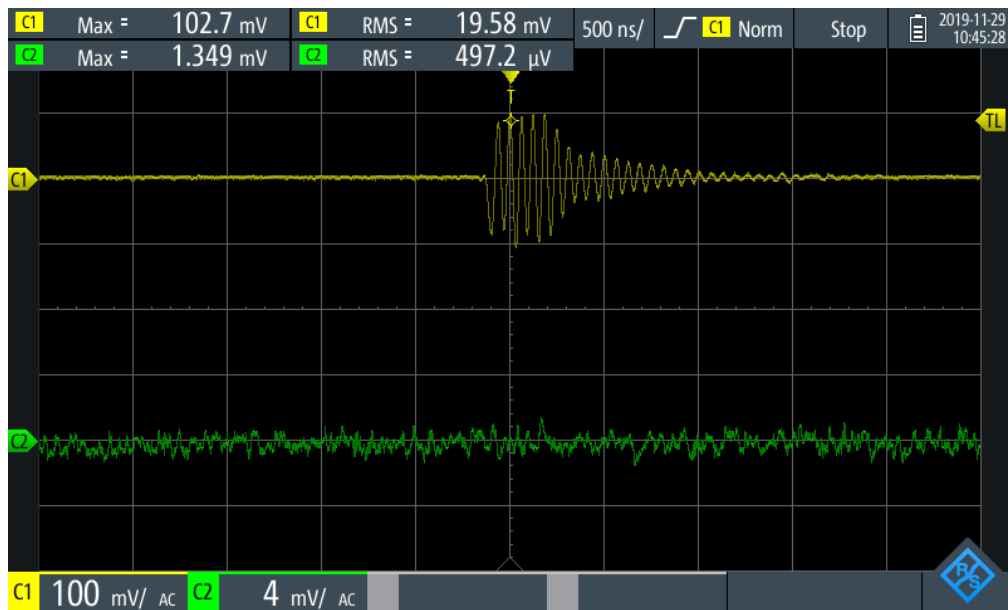
Samaa ilmiötä tarkastellaan myös hiiltä käyttämällä. Toinen virtalenkki on akselin ympärillä ja toinen mittaa akselia hiilen kautta potentiaalintasauskiskolle maadoittavalta kaapelilta (ks. kuvio 16).



Kuvio 16. Akseli maadoitetaan hiilen avulla potentiaalintasauskiskolle ja mitataan virrassa tapahtuvia muutoksia

Akselin ympärillä olevalta virtalenkiltä saatiin jälleen normaalitilannetta huomattavasti suurempia virta-arvoja (ks. kuvio 17). Samalla taajuusalueella akselilta kulkee potentiaalintasauskiskolle hyvin pientä virtaa. Jos akselilla on kiertävää virtaa, joka sulkeutuu kytkimen tai työkonteen kautta takaisin moottoriin, saattaa tulosten mukaan akselille asetettu maadoitushiili pahentaa ongelmaa.





Kuvio 17. Akselin ympärillä oleva virtalenkki kanavalla 1, potentiaalintasauskiskolle kytkettyä kaapelia mittaava virtalenkki kanavalla 2

Alustavien tulosten mukaan moottori vaikutti kärsivän kiertovirrasta. Akselin maadoitusvirran mahdollisuus voidaan kuitenkin rajata pois lisämittauksilla. Rungon maadoituksen tilaa tarkasteltiin summavirtamittauksella ja rungon erillismaadoituksen mittauksella (ks. kuvio 18).



Kuvio 18. Rungon erillismaadoitus kanavalla 1, summavirtamittaus kanavalla 2

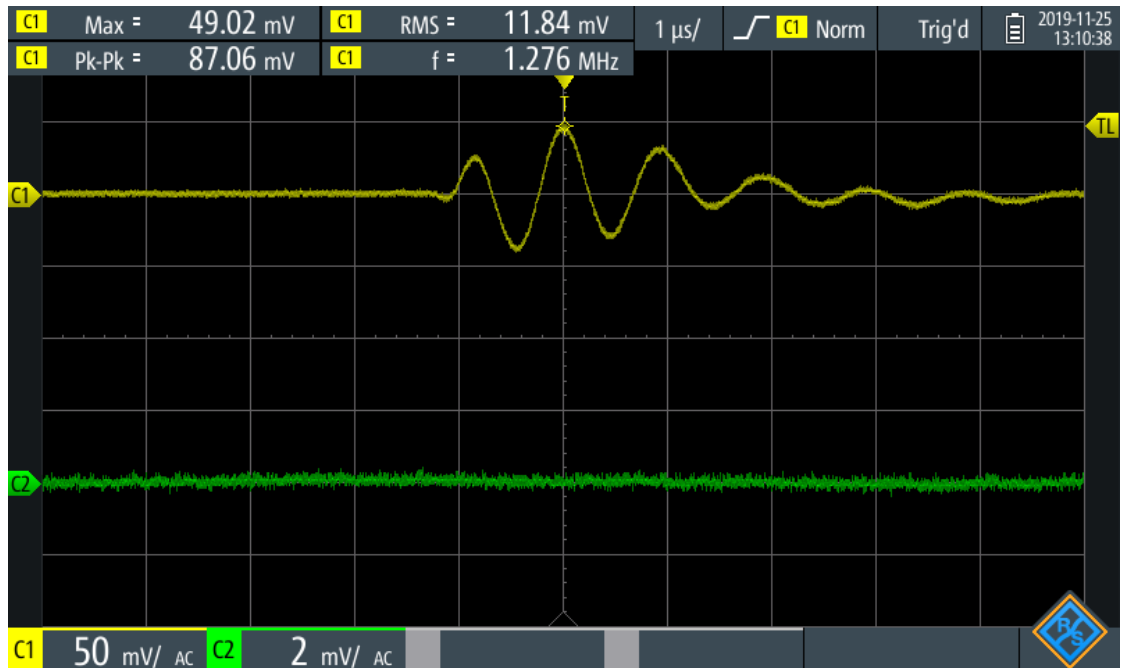
Lyhytkestoisella mittauksella taajuusmuuttajan syöttämän ja sille palaavan virran erotus on huippuarvoltaan vajaan ampeerin luokkaa. Runko maadoittuu useaa eri reittiä pitkin eikä summavirran suuruus vaikuta hälyttävältä. Tekemällä runkoon lisämaadoitus potentiaalintasauskiskolle ja mittaamalla rungosta maihin kulkevaa virtaa saadaan n. 45 mA:n huippuarvoltaan olevaa virtaa. Kun huomioidaan aiemmat tulokset akselin läpi kulkevan virran pahenemisesta lisämaadoituksella, voidaan melko varmasti olettaa moottorissa kulkevan kiertovirtaa.

Kiertovirtamittausta varten hielle rakennettu teline kiinnitettiin magneeteilla moottorin kytkentäkopan päälle ja hiili aseteltiin akselin kohdalle. Hiilessä kiinni oleva puunos kiinnitettiin tukevasti maattoliittimellä moottorin runkoon, luoden D-pään laakerin ohittava oikosulkulenkki. Akseli tarkistettiin vielä strobovaloa käyttämällä, jonka jälkeen hiili asetettiin varovaisesti akselille (ks. kuvio 19).



Kuvio 19. Kiertovirran mittaaminen moottorilta hiilen avulla

Akselilta mitattiin korkeataajuista, noin 0,25 A:n suuruisia virtaa (ks. kuvio 20).



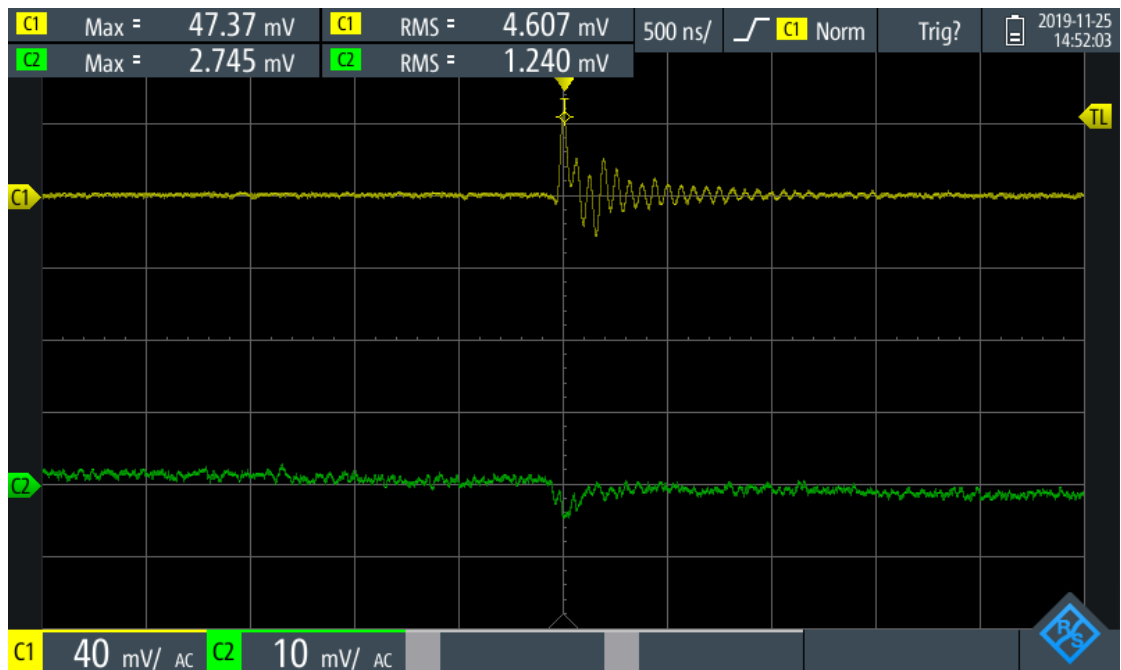
Kuvio 20. Hiilellä akselilta mitattu virta. Kanavalla 2 ei mitausta

Akselin virta-arvoja verrattiin standardin arvoihin (ks. taulukko 3). Virran huippuarvo on suhteellisen pientä mutta virran tehollinen arvo saattaa kertoa haitallisen suuresta laakerivirrasta.

Taulukko 3. Akselilta mitatun virran vertailu standardin raja-arvoihin (PSK 2004, 11)

	Mittauskytkentä	Standardin raja-arvot
	Kiertovirta	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>	<b>0,25</b>	<b>&lt;1 A</b>
		<b>1...2 A</b>
		<b>&gt;2 A</b>
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>		<b>&lt;20 mA</b>
		<b>20...50 mA</b>
	<b>59</b>	<b>&gt;50 mA</b>

Jotta oletetun kiertovirran reitti saadaan selvitettyä, mitataan kytkimen ja työkoneen välisen akselin ympäriltä isommalla virtalenkillä akselin kautta kulkevaa virtaa. Virtalenkki liitettiin oskilloskoopin kanavaan yksi. Pienempi virtalenkki laitettiin kytkintä ja pumppua yhdistävän maadoitusjohtimen ympärille oskilloskoopin kanavaan kaksi (ks. kuvio 21).



Kuvio 21. Kytkimen ja työkoneen välisen akselin mittaus kanavalla 1, näitä yhdistävän maadoituksen virta kanavalla 2

Virran arvoja taulukoidessa huomataan hiilellä mitatun kiertovirran olevan samalla taajisuusalueella ja suuruudeltaan yhtenevä (ks. taulukko 4).

Taulukko 4. Hiilellä akseliilta saatujen virta-arvojen vertailu kytkimen ja työkoneen väliseltä akseliilta saatuun virtaan (PSK 2004, 11)

	Mittauskytkentä		Standardin raja-arvot
	Akseliilta		
	Kiertovirta	Kytkin -> työkone	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>	<b>0,25</b>	<b>0,24</b>	<b>&lt;1 A</b>
			<b>1...2 A</b>
			<b>&gt;2 A</b>
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>			<b>&lt;20 mA</b>
		<b>20</b>	<b>20...50 mA</b>
	<b>59</b>		<b>&gt;50 mA</b>

Moottorilähdön mittaustuloksista päätellen moottorin epäillään kärsivän kiertävästä virrasta, joka kulkee moottorin, kytkimen ja työkoneen välisiä akseleita pitkin ja sulkeutuu takaisin akselin N-päähän muuta reittiä. Virrat saattavat olla haitallisen suuria eikä vikaa kyetty poistamaan rungon lisämaadoituksilla tai hiiliharjalla. Eristetyt

laakerit eivät tarjoa riittävää suojausta, joten moottoriin tulisi vaihtaa kiertovirran katkaisemiseksi hybridilaakerit ja suorittaa uusintamittaukset vian korjaantumisen varmistumiseksi.

#### 5.4.2 Suorat moottorilähdöt kombin ja kengän tyhjiöpumput 231P173 ja 231P174

Suorissa moottorilähdöissä suositellaan laakerivirtamittauksia toteutettavaksi, jos kunnonvalvonnassa löydetään laakerivirtoihin viittaavia piirteitä (PSK, 2004, 8.) Seisakissa luukkujen teon aikaan asiaa ei kuitenkaan kyetty varmistamaan kunnonvalvonnalta, joten päätettiin samassa tilassa sijaitseviin 315 kW:n moottoreihin tehdä myös luukut ja ottaa ne mukaan mittauksiin.

Moottoreille toteutettiin moottorin rungon ja kytkimen välisen maadoituskaapelin, akselin läpi kulkevan, summavirran, moottorin erillismaadoituksen ja kiertovirran mittaukset. Mikään saaduista tuloksista ei viitannut moottoreista löytyvään haitalliseen laakerivirtaongelmaan (ks. taulukot 5 ja 6).

Taulukko 5. Moottorille 231P173 toteutettujen mittausten vertailua standardin arvoihin (PSK 2004, 11)

	Mittauskytkentä		Standardin raja-arvot
	Akselilta	Kiertovirta	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>	<b>0,02</b>	<b>0,05</b>	<b>&lt;1 A</b>
			<b>1...2 A</b>
			<b>&gt; 2 A</b>
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>			
	<b>4,09</b>	<b>9</b>	<b>&lt;20 mA</b>
			<b>20...50 mA</b>
			<b>&gt;50 mA</b>

Taulukko 6. Moottorille 231P174 toteutettujen mittausten vertailua standardin arvoihin (PSK 2004, 11)

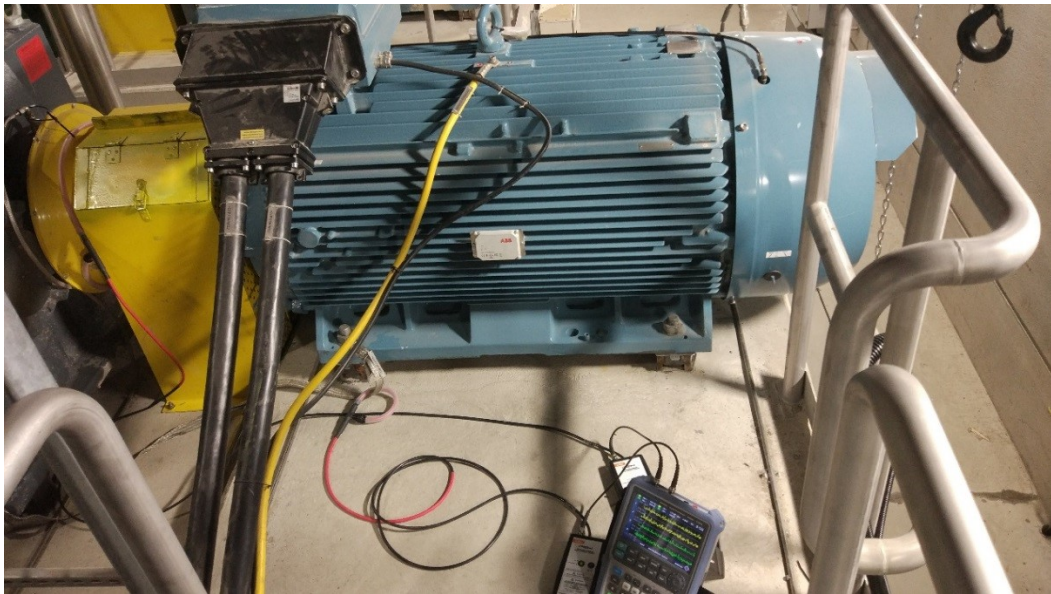
	Mittauskytkentä		Standardin raja-arvot
	Akselilta	Kiertovirta	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>	<b>0,04</b>	<b>0,04</b>	<1 A
			1...2 A
			>2 A
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>			
	<b>6,5</b>	<b>4,5</b>	<20 mA
			20...50 mA
			>50 mA

#### 5.4.3 Lumppurin tyhjiöpumppu 231P172

Lumppurin tyhjiöpumppu valikoitui helpon sijaintinsa vuoksi ensimmäisiin mittauksiin, jossa testattiin oskilloskoopin käyttöä ja verrattiin tuloksia aiemmin samasta positioista tehtyihin mittauksiin. Myös tämän moottorin mittauksia toteutettiin usealla eri mittauskerralla.

Aiemmin keväällä samalla paikalla ollut moottori jouduttiin vikaantumisen vuoksi vaihtamaan. Pajalla korjattavaksi lähetetystä moottorista löydettiin kiertovirran merkkejä, molempien päiden laakerikuulat olivat himmenneet ja laakerirasva oli tummunut ja kovettunut. Tästä syystä pajalla päätettiin moottoriin vaihtaa N-pään hybridilaakerit ja lähettää moottori korjauksen jälkeen takaisin Äänekosken tehtaalle. Position tämänhetkessä moottorissa on eristepinnalliset laakerit ja mikäli haitallisen suuria virtoja löytyy, tulisi tämänhetkinen moottori vaihtaa pajalta takaisin lähetettyyn varastossa olevaan hybridilaakereilla varustettuun moottoriin mahdollisimman pian.

Mittaukset aloitettiin kytkemällä isompi virtalenkki kytkinsuojan ympäri moottorin akselin päälle. Toiseen kanavaan kytkettiin moottorin runkoa ja kytkintä yhdistävä maadoituskaapeli (ks. kuvio 22).



Kuvio 22. Virtalennillä akselilta mittaaminen ja moottorin runkoa ja kytkintä yhdistävän maadoituskaapelin mittaaminen

Akselia pitkin kulkee suhteellisen pieniä virtoja. Suurtaajuusmaadoitus maadoittaa moottorin runkoa työkoneneen suuntaan. Akselivirtojen käyrämuoto muistuttaa kierto-  
virralle tyyppisempää käyrää (ks. kuvio 23).



Kuvio 23. Akselilta mitattu virta kanavalla 1, kytkimen ja moottorin rungon välinen maadoituskaapelin virta kanavalla 2

Rungon maadoituksen toimivuutta tarkastellaan mittaamalla summavirta ja rungon erillismaadoituksen virta (ks. kuvio 24). Summavirran huippuarvo on yhden ampeerin luokkaa, erillismaadoituksen kautta kulkevan virran huippuarvo noin 160 mA. Summavirta ja muut maadoitusten mittaukset eivät anna aihetta epäillä akselin maadoitusvirtoja.



Kuvio 24. Rungon potentiaalintasauskiskolle menevän maadoituskaapelin virta ja summavirta. Maadoituskaapeli kanavalla 1, summavirta kanavalla 2

Rungon maadoitusta tarkastellaan vielä kytkemällä moottorin runko suoraan tilassa olevaan potentiaalintasauskiskoon kuparipunoskaapelilla ja mittaamalla maihin kulkevaa virtaa (ks. kuvio 25).

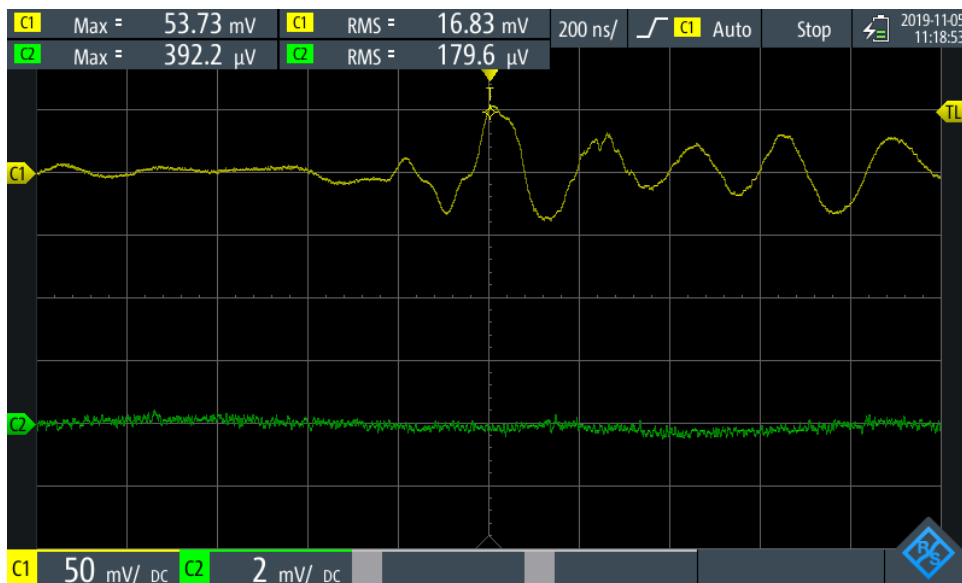




Kuvio 25. Runko maadoitettiin tilassa olevaan potentiaalintasauskiskoon ja mitattiin maadoituksen läpi kulkevaa virtaa

Rungon lisämaadoituksen kautta maihin kulkee melko pientä virtaa, joten runko vaikuttaa tehokkaasti maadoitetulta. Huippuarvoltaan virta oli noin 15 mA.

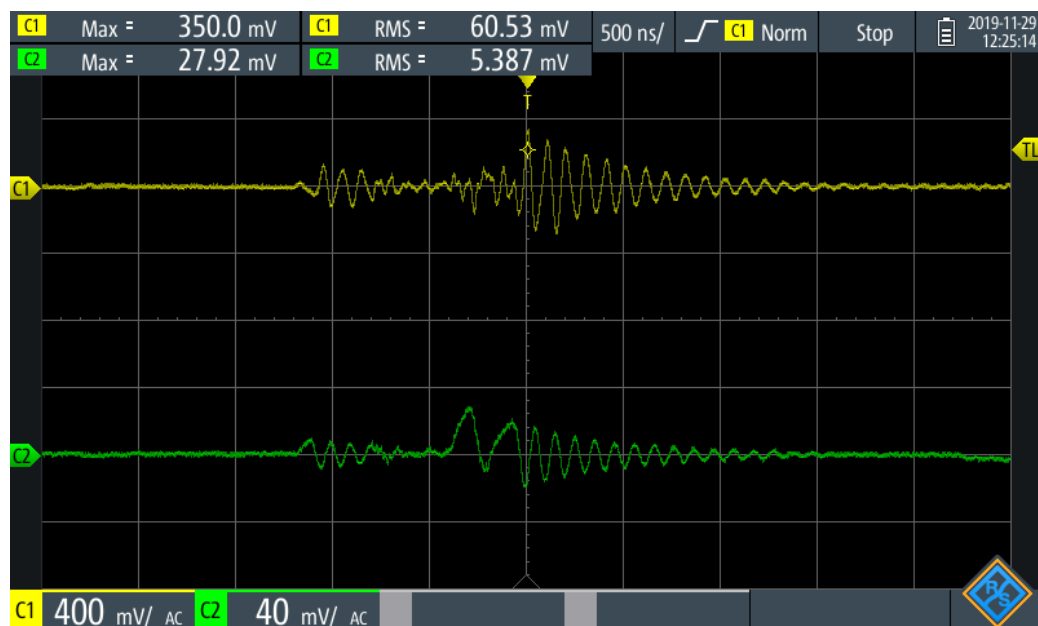
Samalla tarkistettiin jännite-ero moottorin rungon ja potentiaalintasauskiskon välillä (ks. kuvio 26).



Kuvio 26. Jännitteen mittaus moottorin rungon ja potentiaalintasauskiskon väliltä. Jännitemittaus kanavalla yksi, kanavalla kaksi ei mitausta

Kiertovirran mittaamiseksi hiiliharjalle rakennettu teline kiinnitettiin magneeteilla moottorin kytkentäkopan päälle. Akselin pinta ja pyörimissuunta tarkistettiin vielä kerran strobovaloa käyttämällä. Hiileen kiinnitetyllä johtimella muodostettiin oikosulkenkki moottorin akselin ja rungon välille, asetettiin virtalenkki paikoilleen ja hiili painettiin kiinni akseliin.

Kiertovirran mittauksesta saadaan suhteellisen suuria virta-arvoja ja virran muoto sekä taajuusalue on hyvin samankaltainen oppikirjamaisen kiertovirran käyrämuodon kanssa (ks. kuvio 27).



Kuvio 27. Kiertovirran mittaus D-pään laakerit ohittamalla kanavalla 1. Kanavalla 2 akselin yli oleva virtalenkki

Kiertovirran mittauksella saatua huippu- ja tehollisarvoa vertaillaan standardiin (ks. taulukko 7).

Taulukko 7. Kiertovirran mittauksen arvoja standardiin vertailtuna (PSK 2004, 11)

	Mittauskytkentä	Standardin raja-arvot
	Kiertovirta hiilellä	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>		<1 A
	<b>1,75</b>	1...2 A
		>2 A
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>		<20 mA
		20...50 mA
	<b>302,65</b>	>50 mA

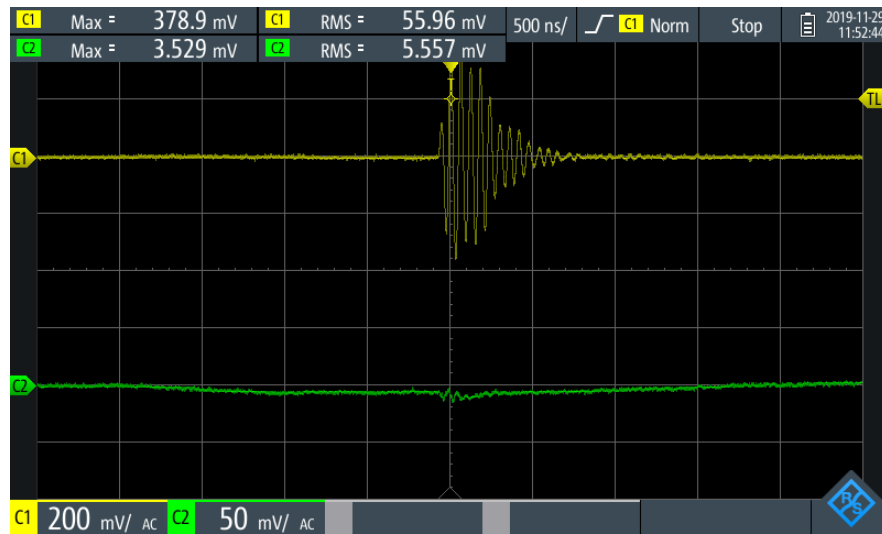
Mittauksessa tarkastettiin vielä akselin ja rungon välinen potentiaaliero. Jännitteen huippuarvoksi saatiin noin 1,4 voltia (ks. kuvio 28). Jännite ei ole huolestuttavan korkea.



Kuvio 28. Jännitemittaus moottorin akselin ja rungon väliltä

Tähänastiset mittaustulokset viittasivat moottorissa esiintyvään kiertävään virtaan. Samalle moottorille toteutettiin myöhemmin uusintamittauksia, tarkoituksena katsoa mahdollisten ratkaisuiden vaikutusta virran suuruuteen. Mittauksissa käytettiin hyväksi oskilloskoopin logger-toimintoa toteuttamalla virtaan vaikuttava kytkentä ja tallentamalla sitä viiden minuutin ajan. Ensimmäisessä mittauksessa mitataan akselia

pitkin kulkevaa virtaa suoraan virtalengin avulla ja tarkastellaan tuloksia (ks. kuvio 29).



Kuvio 29. Akselin yli mitatun virran suuruus kanavalla 1, kanavalla 2 moottorin rungon ja kytkimen välinen maadoitus

Virran huippuarvo käy mittauksen aikana yli kahdessa ampeerissa. Mittauksesta talletettiin vielä samaa aika-arvoa käyttäen virta-arvoja kytkemällä moottorin runko tiilassa olevaan potentiaalintasauskiskoon sekä kytkemällä hiilen avulla akseli potentiaalintasauskiskoon. Akselia maadoittaessa mitataan myös samalla taajuusalueella akselilta poistuvan virran suuruutta toisella kanavalla (ks. kuvio 30).



Kuvio 30. Kanavalla yksi akselia pitkin kulkevan virran suuruus, kanavalla kaksi hiilen potentiaalintasauskiskolle maadoittaman virran suuruus

Saaduista tiedoista muodostettiin Excelin avulla keskiarvot mitatulta 5 minuutin ajanjaksolta (ks. taulukko 8). Jos virtojen suuruudessa olisi enemmän eroa, voisi kytkennän vaikutusta akseliin havainnollistaa visuaalisesti muodostamalla mittaustiedoista kuvaajat. Tulosten perusteella edes akselin maadoitus esimerkiksi maadoitusharjaa käyttämällä ei kuitenkaan poista virtaa tarpeeksi tehokkaasti.

Taulukko 8. Akselin normautilan, rungon lisämaadoituksen ja potentiaalintasauskiskolle maadoitetun akselin virran keskiarvot (PSK 2004, 11)

	Mittauskytkentä			Standardin raja-arvot
	Akseli	Lisämaadoitus	Aks. maadoitus	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>				<1 A
	<b>1,41</b>	<b>1,46</b>	<b>1,33</b>	1...2 A
				>2 A
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>				<20 mA
				20...50 mA
	<b>201,05</b>	<b>213,45</b>	<b>179,86</b>	>50 mA

Myös kytkimen ja työkoneen välisen akselin virta tarkastettiin virtalenkillä (ks. taulukko 9). Tuloksista päätellen virta kulkee akselia pitkin kytkimelle, mutta kytkimestä työkoneen akselia pitkin kulkee hyvin vähän virtaa.

Taulukko 9. Kytkimen ja työkoneen välisen akselin virran mittaus (PSK 2004, 11)

	Mittauskytkentä	Standardin raja-arvot
	Akselilta	
<b>Huippuarvo <math>I_p</math> (A)</b>	<b>0,04</b>	<1 A
		1...2 A
		>2 A
<b>Tehollisarvo RMS (mA)</b>		<20 mA
	<b>6,5</b>	20...50 mA
		>50 mA

Mittausten perusteella moottorilähdössä saattaa olla laakereille haitallisen suurta kiertävää virtaa, joka kytkeytyy akselia pitkin kytkimelle. Moottorilähtöön on laakereiden pidemmän elinkaaren takaamiseksi vaihdettava varastossa sijaitseva hybridi-laakerillinen moottori ja toteutettava uusintamittaukset, jotta varmistutaan virran rajoittumisesta.

## 5.5 Kuivauskoneen puhaltimet

Tarkoituksena oli ottaa mittauksiin myös kuivauskoneen puhaltimia. Puhaltimia on jouduttu vaihtamaan laakeriongelmien vuoksi huolimatta niiden suhteellisen lyhyestä käyttöiästä. Laakereista on lisäksi löytynyt viitteitä laakerivirtaongelmista himmenneiden laakerikuulien muodossa. Koneet ovat suhteellisen pientehoisia ja -kokoisia runkokooltaan. Muun muassa tästä syystä vahvana epäilynä on ollut mahdolliset kapasitiiviset vuotovirrat. (Iisakkala 2019.)

Moottoreiden kopan takaosaan valmisteltiin aukko, jotta hiili saadaan aseteltua moottorin akselille N-pään kautta. Puhaltimen moottorit ovat ahtaassa moduulissa, eikä ajopään akseliin pääse käsiksi ajon aikana (ks. kuvio 31).



Kuvio 31. Puhallinkaapista irrotetussa moduulissa sijaitseva moottori

Lisäksi aiemmin tilattiin pienempiä hiiliä juuri pienikokoisempien moottoreiden mittausten vuoksi. Hiili ja hiilen teline valmisteltiin alumiinitelineelle ja punoskaapelille sopivaksi, joten mittauksia on nopea alkaa tekemään sopivan ajan löydyttyä.

Koska kapasitiivisista laakerivirroista ei voida mitata suoraan virtaa maadoittamatta virtaa tuottavaa jännitelähdettä, on puhaltimissa toteutettava jännitemittaus ja tarkasteltava siinä tapahtuvia muutoksia kytkentäaajuudella ennen ja jälkeen korjaavien toimenpiteiden. (PSK 2004, 5.)

Puhaltimia ei voida sammuttaa kesken ajon radan katkeamisriskin vuoksi ja kaapissa liikkuva ilmavirta saattaa nostaa virrattoman moottorin pyörimisnopeuden jopa nimellishopeutta suuremmaksi. Moottorin kopan vaihtaminen aukolliseen täytyisi siis toteuttaa seisakin aikana turvallisuuden vuoksi. Puhaltimien mittauksia oli kuitenkin vaikea aikatauluttaa muiden mittausten kanssa yhteen ja oikeaa hetkeä toteuttamiseen saattaa joutua odottamaan viikkoja kerrallaan. Puhaltimet olivat alun perin tarkoitus ottaa mukaan opinnäytetyön mittauksiin mutta aikataulujen vuoksi mittaukset jäivät toteuttamatta. Osaan puhaltimista on asennettu maadoitusharjoja ja olisi ollut hyvä saada vertailu harjallisen ja harjattoman puhaltimen jännite-eroista.

## 6 Tulosten analysointi

Mittauksista saatiin kerättyä laajasti hyödynnettävää dataa. Mittauksiin valikoiduista moottoreista saatiin kartoitettua laakerivirtaongelmien laajuutta, virtojen suuruutta ja kehitettyä korjaavia toimenpiteitä. Tulokset vastasivat pitkälti teoriassa aiheesta opittua asiaa. Kunnonvalvonnalla on ollut jo aiempaa epäilyä laakerivirroista alueella sijaitsevilla moottorilähdöissä, mutta työn avulla saatiin konkreettisesti todistettua haitallisen suurien laakerivirtojen olemassaolo. Mittauksiin käytettävä tarvikkeisto saatiin tilattua ja testattua kaiken laitteiston toimivuus käytännön mittauksissa. Mittauksia jatketaan tehtaalla opinnäytetyön jälkeen samoja tarvikkeita hyväksi käyttäen.

Laakerivirtojen mittaaminen ja tulosten analysointi vaatii hyvin vahvaa aiheeseen perehtymistä ja ymmärrystä aiheeseen liittyvistä sähköisistä ilmiöistä. Tästä syystä ennen lopullisten toimenpiteiden toteuttamista virtojen rajoittamiseksi tulisi konsultoida ammattilaista tulosten oikean arvion varmistamiseksi.

## 7 Johtopäätökset

Opinnäytetyötä alettiin tekemään alustavasti jo heinäkuun alussa mutta ensimmäiset mittaukset päästiin toteuttamaan vasta marraskuussa. Pelkissä laite- ja muissa tarvikkehankinnoissa meni pahimmillaan viikkoja tai kuukausia. Tehtaalla kunnossapidollisesta valvonnasta huolehtiva henkilö oli kuitenkin aiemmin toteuttanut laakerivirtamittauksia, joten esimerkiksi käytettävän kaluston toimittajat ja vaadittavat tarvikkeet löytyivät nopeasti. Lisäksi itse mittauksiin sai välitöntä asiantuntija-apua.

Toimeksiantajan puolesta työhön sai vapaat kädet ja mittauksia kykeni toteuttamaan omalla aikataululla. Laakerivirtojen kartoitus, mittaus ja ehkäisevät toimenpiteet ovat kuitenkin työläs ja suhteellisen pitkäkestoinen prosessi. Lisäksi aikataulua täytyi sovittaa prosessin kulloisenkin ajotilanteen mukaan.

Aihe on kuitenkin mielenkiintoinen ja materiaalia on runsaasti saatavilla. Käytännössä tapahtuvien mittausten edetessä oma ymmärrys aiheeseen liittyen kasvoi ja aiempien tuloksien analyysijä pystyi tarkastelemaan kriittisemmin. Samoillemoottoreille täytyi toteuttaa juuri tästä syystä uusintamittauksia. Tärkeänä asiana mittauksissa huomasijatkuvan tarkastelun ja vaiheiden ylös kirjaamisen tärkeyden. Tuloksia tarkastellessa tuhlaantuu paljon aikaa, ellei jokaisesta mittauksessa ole kirjoitettu ylös vaiheittain tehtyjä asioita ja tuloksien suuruutta.

Itse työssä mittausten toteuttamiseen ja tulosten tarkasteluun sai alueella toimivalta sekä yrityksen ulkoiselta asiantuntijalta erittäin paljon apua.



## Lähteet

- ABB:n teollisuustaaajuusmuuttajat. 2015. Helsinki: ABB. Viitattu 20.11.2019.  
[https://library.e.abb.com/public/cb0da58246ba4a62aaae948d808fcc7d/FI\\_ACS880\\_single\\_drives\\_3AUA0000124140\\_RevJ.pdf](https://library.e.abb.com/public/cb0da58246ba4a62aaae948d808fcc7d/FI_ACS880_single_drives_3AUA0000124140_RevJ.pdf)
- Ahoranta, J. Sähkötekniikka. 2008. Helsinki: WSOY Oppimateriaalit.
- Application notes. 2002. Power Electronics Measurement-yrityksen rogowski-virranmittauskelan esite. PDF. Viitattu 20.11.2019.  
<http://www.pemuk.com/Userfiles/CWT/CWT%20-%20Technical%20notes%20-%200001.PDF>
- Chen, S. Fitzgerald, D . Lipo, T.A. Source of Induction Motor Bearing Currents Caused by PWM Inverters. IEEE Transactions on Energy Conversion, 11, 1, 25-32. Viitattu 17.11.2019. <https://janet.finna.fi>, IEEE/IET Electronic Library
- Chen, S. Lipo, T.A. Circulating type motor bearing current in inverter drives. Industry Applications Magazine, 4, 1, 32-38. Viitattu 28.8.2019. <https://janet.finna.fi>, IEEE/IET Electronic Library
- Hytönen, V. 2016. Sähkötekniikka-opintojakson opiskelumateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Vaihtosähkö. Viitattu 11.11.2019. Optima-oppimisympäristö.
- Iisakkala, J. ABB. Puhelinkeskustelu. 11.07.2019.
- Kanninen, J. 2011. Laakerivirrat kestopagneettitahtikoneissa. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, sähkötekniikka. Viitattu 11.11.2019.  
[https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/72664/Kanninen\\_Jarno%20Dipl.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/72664/Kanninen_Jarno%20Dipl.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Metsä Fibre. 2017. Biotuotetehtaan yleisesittely. Metsä Fibren yritys esittely. Viitattu 11.11.2019.
- Muetze, A. 2004. Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors. Väitöskirja. Sähkö- ja informaatiotekniikan tutkimusosasto. Viitattu 28.8.2019. <https://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/dissertationen/dissannette.pdf>
- PSK 7708. 2004. Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Akselijännitteen ja -virran mittausta. Helsinki: PSK Standardointiyhdistys ry. Viitattu 28.8.2019
- Puromäki, O. 2018. BTT kunnossapito. Botnia Mill Servicen yritys esittely. Viitattu 11.11.2019.
- Reference manual. Grounding and cabling of drive systems. 2013. Helsinki: ABB. Viitattu 24.10.2019. (ainakin muokattu tamukuva täältä)  
[https://library.e.abb.com/public/64a0f2f7292bcfd7c1257b3a003993ea/EN\\_Grounding\\_and\\_cabling\\_rev\\_C.pdf](https://library.e.abb.com/public/64a0f2f7292bcfd7c1257b3a003993ea/EN_Grounding_and_cabling_rev_C.pdf)

Rogowski probe for measuring hf commonmode currents in VSDs. 2018. Power Electronic Measurements. Virranmittauskelojen esite. Viitattu 2.12.2019.  
[http://www.pemuk.com/Userfiles/CMC/CMC\\_1018\\_Web.pdf](http://www.pemuk.com/Userfiles/CMC/CMC_1018_Web.pdf)

Signaalin näytteenotto. N.d. Aalto-yliopiston automaatio- ja systeemitekniikan laitoksen verkkokurssi. Viitattu 20.11.2019.  
<https://coursebackup.aalto.fi/as/Verkkokurssit/AS-74.2112/oppitunti2/naytteenotto.html>

SKF-laakerien kunnossapito. 2016. SKF yhtymä. Viitattu 28.8.2019.  
[https://www.skf.com/binary/123-290853/skf-laakerien-kunnossapito---skfbearing-maintenance-handbook---10001\\_1-fi.pdf](https://www.skf.com/binary/123-290853/skf-laakerien-kunnossapito---skfbearing-maintenance-handbook---10001_1-fi.pdf)

Särkimäki, V. 2009. Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Viitattu 28.8.2019.  
<https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/45048/isbn9789522147479.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Tekninen opas nro 5 - Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä. 2000. Helsinki: ABB. Viitattu 28.8.2019.  
[https://library.e.abb.com/public/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopas\\_nro5.pdf](https://library.e.abb.com/public/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopas_nro5.pdf)

Ylijännite- ja häiriösuojaus, 2000. ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, luku 6. Helsinki: ABB. Viitattu 24.10.2019.  
[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/06\\_0\\_Ylij%84nnite-%20ja%20h%84iri%94suojaus.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/06_0_Ylij%84nnite-%20ja%20h%84iri%94suojaus.pdf)