LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT ENERGIA

SÄHKÖTEKNIIKKA

Jarno Kanninen

LAAKERIVIRRAT KESTOMAGNEETTITAHTIKONEISSA

Työn tarkastajat: **Professori Juha Pyrhönen**

DI Antti Vahvaselkä

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

LUT Energia

Sähkötekniikka

Jarno Kanninen

Laakerivirrat kestomagneettitahtikoneissa

Diplomityö

2011

84 sivua, 44 kuvaa, 6 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Professori Juha Pyrhönen

DI Antti Vahvaselkä

Hakusanat: laakerivirta, akselijännite, kestomagneettitahtikone

Keywords: bearing current, shaft voltage, permanent magnet synchronous machine

Diplomityössä on esitelty ja tutkittu laakerivirtailmiötä sähkökoneissa. Työn pääpaino on suurissa kestomagneettitahtikoneissa, joissa niin sanotut kiertävät laakerivirrat ovat dominoivia. Työssä on lisäksi tarkasteltu staattorin segmentoinnin aiheuttamia matalataajuisia kiertovirtoja. Laakerivirran ja akselijännitteen ehkäisyyn on esitetty sekä testattu mahdollisia ratkaisuja.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

LUT Energy

Electrical Engineering

Jarno Kanninen

Bearing Currents in Permanent Magnet Synchronous Machines

Master's thesis

2011

84 pages, 44 figures, 6 tables and 3 appendices

Examiners: Professor Juha Pyrhönen

M.Sc. (Tech.) Antti Vahvaselkä

Keywords: bearing current, shaft voltage, permanent magnet synchronous machine

The bearing current phenomenon in electrical machines is investigated. Emphasis of this thesis is in large permanent magnet synchronous machines where so called circulating bearing currents are dominating. Also low-frequency circulating currents in machines with segmented stator are studied. Many mitigating possibilities for bearing current and shaft voltage problems are proposed and some of those are tested.

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty eräänlaiseksi laakerivirta-käsikirjaksi tuulivoimayritys *The Switch Drive Systems*:lle. Työssä on kerrottu sähkökoneissa haasteita aiheuttavien laakerivirtojen syntymekanismeista, niiden luonteesta ja mahdollisista ehkäisykeinoista. Työ on tehty yrityksen suuria kestomagneettitahtigeneraattoreita silmällä pitäen sekä näitä koneita testaten.

Innostuin diplomityön aiheesta heti, kun sitä minulle ehdotettiin. Diplomityön edetessä huomasin, että yrityksessä tieto laakerivirroista oli varsin hajanaista, eikä laakerivirtatiedon soveltamisesta käytäntöön ja tuotantoon ollut selkeää näkemystä. Näkisinkin, että diplomityö tästä aiheesta tuli tarpeeseen.

Työssä riitti haastetta, sillä laakerivirta-aihe on todella laaja ja oleelliset asiat piti mahduttaa työhön vähintäänkin pintaa raapastaen. Yrityksen kannalta tärkeimpiin aiheisiin on paneuduttu työssä myös käytännön mittausten avulla. Muutamia tärkeitä yhtälöitä laakerivirtojen estimoinnin kannalta on esitetty.

Erityiskiitokset diplomityöhön saamastani tuesta ja opastuksesta osoitan Mika Neuvoselle. Lisäksi kiitän työn tarkastajia Antti Vahvaselkää ja Juha Pyrhöstä. Kiitokset myös The Switchille mielenkiintoisesta aiheesta sekä mahdollisuudesta tämän työn tekemiseen.

Jarno Kanninen 31.10.2011

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO **9**
1.1 Taajuusmuuttajan aiheuttama yhteismuotoinen jännite 10
1.2 Matalataajuiset kiertovirrat ja akselijännite 11
2 LAAKERIVIRRAT SÄHKÖKONEISSA **15**
2.1 Kapasitiivisesti kytkeytyvät laakerivirrat 16
2.2 Induktiivisesti kytkeytyvät laakerivirrat 20
2.3 Roottorin maadoitusvirrat 23
2.4 Laakerivirtojen vaikutus laakeriin 24
2.5 Laakerin vaikutus laakerivirtoihin 29
2.5.1 Laakerin voiteluaineen vaikutus laakerivirtoihin 29
2.5.2 Laakerin laadun vaikutus laakerivirtoihin 29
2.5.3 Laakerimallin ja -koon vaikutus laakerivirtoihin 30
3 LAAKERIVIRTOJEN EHKÄISYMENETELMÄT **31**
3.1 Konvertterin muutokset 31
3.2 Kaapelointi 32
3.3 Sähkökoneen muutokset 33
3.3.1 Hybridilaakerit 34
3.3.2 Johtava laakerin voitelu 35
3.3.3 Laakerin eristys 36
3.3.4 Akselin maadoitus 38
3.3.5 Koneen rungon maadoitus 42
3.3.6 Elektrostaattinen suoja 43
4 MITTAUKSET JA ANALYSOINTI **44**
4.1 Käämeistä purkautuva yhteismuotoinen virta 44
4.1.1 Levykondensaattorin kapasitanssin mittaukset 45
4.1.2 Kytkentätaajuuden vaikutus yhteismuotoiseen virtaan 49
4.2 Kestomagneettitahtikoneelle tehdyt laakerivirta- ja akselijännitemittaukset 50
4.2.1 Akselijännitteen mittaus 51
4.2.2 Yhteismuotoisen virran mittaus 56
4.2.3 Maadoitusvirran mittaus 57
4.2.4 Hiiliharjavirrat ja matalataajuiset kiertovirrat 59
4.2.5 Akselivirtamittaukset 63
4.2.6 Tyhjäkäyntimittaukset yhdellä konvertteriyksiköllä nimellisnopeudella 64
4.2.7 Tyhjäkäyntimittaukset kolmella konvertteriyksiköllä 72
4.2.8 Kuormitusmittaukset 74
5 YHTEENVETO **79**

LÄHDELUETTELO **81**

LIITTEET

LIITE 1. LEVYKAPASITANSSIN MITTAUSJÄRJESTELYT

LIITE 2. KÄYTETYT MITTALAITTEET

LIITE 3. PESÄERISTEEN MITTAUKSET

Lyhenteet ja symbolit

BVR	Bearing Voltage Ratio (laakerijännitesuhde)
DC	Direct Current (tasavirta)
fft	fast fourier transform (nopea Fourier-muunnos)
EDM	Electric Discharge Machining (sähkökipinätyöstö)
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGB-transistori)
PE	Protective Earth (suojamaa)
PWM	Pulse Width Modulation (pulssin leveys modulaatio)
smv	sähkömotorinen voima

A	pinta-ala [m^2]
A_H	Hertzin kontaktipinta [mm^2]
c	valon nopeus [299 792 458 m/s]
C	kapasitanssi [F]
C_{ar}	akseli-runko-kapasitanssi [nF]
$C_{laakeri}$	laakerikapasitanssi [nF]
C_{ka}	käämi-akseli-kapasitanssi [nF]
C_{kr}	käämi-runko-kapasitanssi [nF]
d	paksuus, välimatka [m]
d	derivaatta
f	taajuus [Hz]
f_{sw}	kytkentätaajuus [Hz]
I	virta [A]

i_b	laakerivirta [A]
I_{CM}	yhteismuotoinen virta [A]
i_{bcc}	laakerikiertovirta [A]
i_{ec}	maadoitusvirta [A]
J_b	näennäisvirrantiheys [A/mm^2]
N_j	liitosten lukumäärä staattorissa segmentoidussa sähkökoneessa
N_p	napojen lukumäärä
R	resistanssi [Ω]
t	aika [s]
t_r	nousuaika [s]
T	jaksonaika [s]
U	jännite [V]
U_{CM}	yhteismuotoinen jännite [V]
$U_{laakeri}$	jännite laakerin yli [V]
v	nopeus [m/s]
ε_0	tyhjiön permittiivisyys [$8.854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m]
$\varepsilon_{ins,\,r}$	eristeen suhteellinen permittiivisyys
ε_r	suhteellinen permittiivisyys
μ_r	suhteellinen permeabiliteetti

1 JOHDANTO

Tuulivoimalan suunniteltu elinikä on yli 20 vuotta. Myös tuulivoimageneraattorin laakereiden on suunniteltu kestävän tämän ajan. Mekaanisten rasitusten ohessa laakereihin voi kohdistua myös virtarasitusta, mikä saattaa lyhentää laakereiden kestoikää merkittävästi. Tässä diplomityössä perehdytään laakerivirtojen aiheuttamiin ongelmiin kestomagneettitahtikoneissa sekä niiden ehkäisyyn. Työssä tarkastellaan pääasiassa yhteismuotoisen jännitteen aiheuttamia laakerivirtoja ja niiden ehkäisemistä. Tehokkaalla eristyksellä saadaan korkeataajuisten yhteismuotoisten virtojen kulkua laakerin kautta riittävästi vaimennetuksi ja hyvällä maadoitusratkaisulla maadoitetuksi. Laakerivirtaongelmat ovat yhtäläisiä sekä moottoreille että generaattoreille, joten työssä tarkasteltavat moottoreihin liittyvät esimerkit valaisevat myös vastaavien generaattoreiden käyttäytymistä.

Sähkökoneiden laakerivirta- ja akselijänniteongelmat tunnettiin jo sata vuotta sitten. Tuolloin ne johtuivat lähinnä koneen magneettisesta epäsymmetriasta sekä läpilyönneistä eristeissä [1]. Nykyisin koneen epäsymmetriaa aiheuttavat lähinnä vuotovirrat koneen käämeistä runkoon sekä koneen segmentoitu rakenne. Erityisesti segmentoitu rakenne voi aiheuttaa suuriakin matalataajuisia virtoja laakereiden läpi.

Taajuusmuuttajakäyttöjen yleistyttyä, ovat korkeataajuisten laakerivirtojen aiheuttamat ongelmat kasvaneet merkittävästi. Taajuusmuuttajien kytkentähäviöitä pyritään pienentämään kasvattamalla kytkentänopeuksia. Laajasti kytkiminä käytetyt IGB-transistorit mahdollistavat nykypäivänä jopa noin 50 ns kytkentäajat. Tämä sallii kytkentätaajuuden nostamisen, mikä parantaa sähkökoneen virran laatua ja pienentää sähkökoneen harmonishäviöitä. Nopeat jännitteen nousuajat ovat kuitenkin haitallisia. Kun jännitepulssit kohtaavat generaattorin hajakapasitanssit, ne synnyttävät korkeataajuisia vuotovirtoja koneen rakenteisiin. [1, 2, 3]

Korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite koneen käämeissä jakautuu osittain koneen hajakapasitanssien välille. Laakereiden voiteluaine ja vierintäpinnat muodostavat omat hajakapasitanssinsa, jonka yli osa korkeataajuisesta yhteismuotoisesta jännitteestä vaikuttaa. Laakerijännitteen ylittäessä laakerin voitelukalvon läpilyöntikestävyyden syntyy laakerivirtapulssi. Laakerivirrat voivat olla ampeerien suuruisia, korkeataajuisia ja niiden aiheuttama paikallinen virratiheys voi olla suuri. Korkeiden virrantiheyksien

vuoksi laakerien vierintäpinnoille sulaa pieniä ”kraatereita”. Tämä aiheuttaa laakereihin mekaanisia vaurioita, sillä läpilyönnit syövyttävät ajan myötä laakerin vierintäpintaa.

Sähkökoneissa esiintyvät laakerivirrat voidaan jakaa moniin luokkiin: kiertäviin ja ei-kiertäviin, johtuviin ja indusoituviin, matalataajuisiin ja korkeataajuisiin. Tässä työssä pääpaino on kiertävien korkeataajuisten laakerivirtojen sekä matalataajuisten, koneen epäsymmetrian aiheuttamien kiertovirtojen tarkastelussa. Työssä tehdyt mittaukset on suoritettu 4.3 MW suoravetoiselle kestomagneettitahtikoneelle, jossa on käytetty segmentoitua staattorirakennetta. Työn ulkopuolelle rajataan tehonmuokkaimiin tehtävät muutokset ja mahdolliset suodatinratkaisut.

1.1 Taajuusmuuttajan aiheuttama yhteismuotoinen jännite

Laakerivirtoja sähkökoneeseen aiheuttaa taajuusmuuttajakäytöissä pääasiassa korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite konvertterin lähdössä. Yhteismuotoisen jännitteen muodostuessa koneen käämeihin, purkautuu vuotovirtoja koneen runkoon, akselille ja laakereihin. Osa käämien yhteismuotoisesta jännitteestä jakautuu koneen hajakapasitanssien välille. Tämä aiheuttaa ylimääräisiä virtareittejä ja sähköisiä epäsymmetrioita koneeseen.

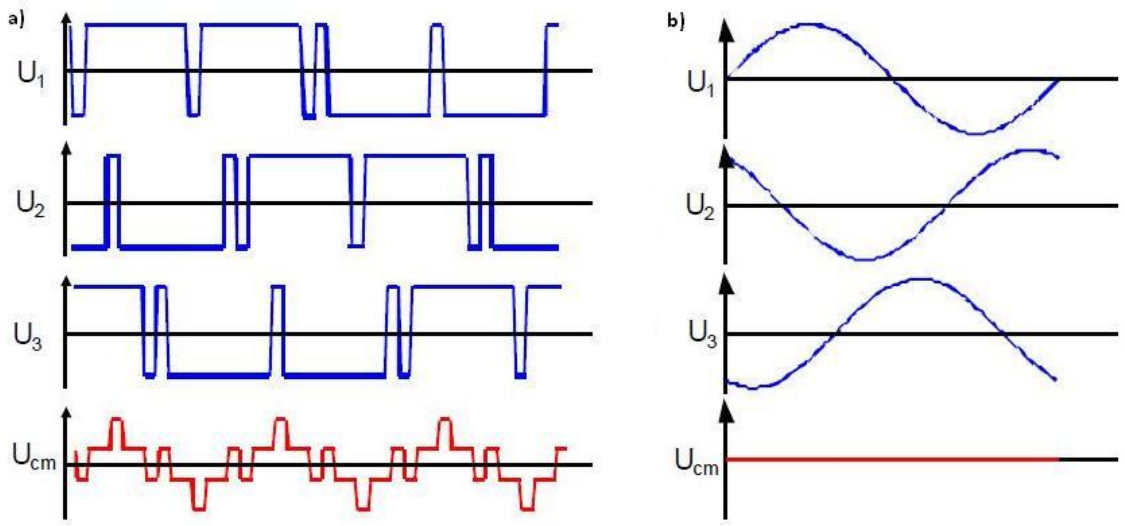
Symmetrisestä kolmivaiheverkosta syötetyn tähteenkytketyn koneen vaihejännitteiden hetkellisarvojen summa on nolla, jolloin koneen tähtipisteen jännite on ideaalitapauksessa myös nolla. Syötettäessä konetta esimerkiksi PWM-tekniikkaa käyttävällä taajuusmuuttajalla ei vaihejännitteiden summa ole enää joka hetki nolla ja koneen tähtipisteessä on nähtävissä niin sanottu yhteismuotoinen jännite U_{CM}, (kuva 1).

Konvertterin hakatessa välipiirin tasajännitteestä vaihtojännitettä, pyritään vaihtojännitteen muodolla jännitteen lyhytaikaisen keskiarvon sinimäisyyteen. Tämä tehdään antamalla konvertterin kytkimille ohjeita, milloin kytkeä mihinkin välipiirin tasajännitepotentiaaliin. Kytkimille lasketaan ajat, joiden mukaan niitä pidetään tasajännitteessä. Tämä tekee konvertterin lähtöön erikestoisia pulsseja, joiden pituus painottaa hetkellistä keskiarvoa noudattamaan halutun sinijännitteen amplitudia. Kolmivaihejärjestelmässä tämä johtaa epätasapainoon vaiheiden välillä. Nyt

yhteismuotoinen jännite ei olekaan nolla, vaan pahimmassa tapauksessa jopa 2/3 välipiirin tasajännitteestä [5].

Nykyaikaisilla tehokytkimillä (IGBT) päästään todella lyhyisiin kytkentäaikoihin, jolloin myös yhteismuotoisen jännitteen nousu- ja laskureunat ovat todella jyrkkiä. Kun tämä korkeataajuinen jännite etenee sähkökoneen käämeihin, purkautuu osa siitä sähkökoneeseen hajakapasitanssien kautta ja muuttuu korkeataajuiseksi yhteismuotoiseksi virraksi I_{CM}. Yhteismuotoisen virran amplitudi riippuu koneen hajaimpedanssista, erityisesti reaktanssista [6].

Yhteismuotoinen virta pyritään maadoittamaan sähkökoneen rungosta konvertterin maahan matalaimpedanssisen maadoituksen kautta. Virran kulkureitin induktanssit nostavat kuitenkin sähkökoneen rungon potentiaalia maahan nähden sekä mahdollisesti roottorin potentiaalia sähkökoneen runkoon nähden. Sähkökoneen sisäiset potentiaalierot ja korkeille taajuuksille pienet impedanssit synnyttävät virralle oivallisen reitin vaikkapa laakereiden hajakapasitanssien läpi. [1,7]



Kuva 1. Yhteismuotoinen jännite kolmivaiheisessa a) PWM-syötössä b) verkkosyötössä [8]

1.2 Matalataajuiset kiertovirrat ja akselijännite

Matalataajuisia laakerivirtoja aiheuttaa nykyisillä valmistustekniikoilla lähinnä sähkökoneen osien jako segmentteihin ja roottorin epäkeskisyys. Roottorin

epäkeskisyys indusoi roottoriin akselijännitteen, joka purkautuu usein laakerivirtana. Vaikka nykyisillä valmistustekniikoilla roottorin epäkeskisyys on pienemmissä sähkökoneissa harvinainen ilmiö, on valtavissa suoravetoisissa kestomagneetti-tahtikoneissa vastaavaa symmetrisyyttä melkeinpä mahdoton saavuttaa. Suuri roottorin halkaisija ja roottorille asennetut kestomagneetit aiheuttavat voimakkaita vetovoimia ferromagneettisessa ympäristössä. Tästä syntyy epäsymmetrinen vetovoima, jonka vuoksi roottori ei pysy keskellä staattoria. Lisäksi muutamien millimetrien ilmaväliin akselilta redusoitu valmistuksen toleranssiketju on niin pitkä, että sillä on toleranssiketjun loppupäässä huomattavat vaikutukset. Näin ilmavälin pituus koneen yläpäässä eroaa hieman alapäästä. Tästä päästäisiin eroon tarkentamalla toleransseja, mutta varsinkin suoravetoisten kestomagneettitahtikoneiden valmistuskustannukset nousisivat entistäkin korkeammiksi.

Segmentoituun staattoriratkaisuun voidaan päätyä monista syistä - etenkin koneen kokonaispainon ja koon kasvaessa logistiikan näkökulmasta valtavaksi. Matalataajuiset kiertovirrat syntyvät segmenttirakenteen synnyttämistä permeanssivaihteluista staattoriselässä sekä koneen rungon, roottorin tai staattorin jakamisesta segmentteihin. [9, 29]

Osa staattorikäämissä kulkevien virtojen aikaansaamista voista kulkee staattorin segmenttirakenteen liitoskohtien läpi ja osa yhtenäisessä staattoriselässä. Liitoskohtien läpi kulkevat vuot ovat yhteinäisessä staattoriselässä kulkevia voita hieman heikompia. Tästä syntyy magneettinen epätasapaino, smv koko koneen pituudelle ja edelleen kiertovirtoja pitkin koneen rakenteita. Nämä kiertovirrat voivat pahimmassa tapauksessa kulkea laakereiden läpi. [9, 29]

Tasaisesti jaetun segmenttirakenteen aiheuttamat kiertovirrat voidaan estää oikealla napamäärän N_p ja liitoskohtien N_j suhteella. Kun sievennetyn yhtälön

$$\frac{2N_\mathrm{j}}{N_\mathrm{p}} \tag{1}$$

osoittaja on parillinen, ei segmenttirakenne aiheuta kiertovirtoja. Parittomalla osoittajalla matalataajuisia kiertovirtoja sen sijaan syntyy taajuudella *osoittaja kertaa syöttötaajuus*. Esimerkiksi sähkökoneessa, jossa on 120 napaa ja 12 liitosta, syntyy syöttöjännitteen taajuinen kiertovirta sievennetyn yhtälön (1) saadessa arvon 1/5 – osoittaja = 1. Käytännössä segmenttien liitokset eivät ole täysin symmetrisiä keskenään, ja segmenttien välillä on permittiivisyyseroja, jotka aiheuttavat vääjäämättä pieniä, siedettäviä kiertovirtoja, vaikka yhtälön (1) osoittaja olisikin parillinen. [9, 10, 29]

Myös aksiaaliset rei'ät staattoriselässä (esimerkiksi ilmankiertoa varten) aiheuttavat magneettista epäsymmetriaa ja kiertovirtoja, elleivät ne ole jakautuneet täysin symmetrisesti napojen kannalta. Lisäksi ne lisäävät rautahäviöitä staattorissa. Nämä rei'ät voidaan kuitenkin jakaa tai muotoilla sopivasti staattoriin niin, että ne osittain kumoavat segmenttirakenteen aiheuttamia kiertovirtoja. [9, 29]

Matalataajuiset laakerivirrat ovat korkeataajuisia virtoja helpommin ehkäistävissä jo ohuellakin laakerieristeellä. Ohut laakerieriste toimii laakeripesän ja laakerin ulkokehän muodostaman sylinterimäisen kondensaattorin eristeenä. Mitä ohuempi eriste sitä suurempi kapasitanssi saadaan, jolloin ohut laakeriesite ei juuri estä suuritaajuisten virtojen kulkeua laakerin läpi. Laakerieristeen läpilyöntikestävyys heikentyy vähitellen korkeataajuisten virtapiikkien vaikutuksesta, kun niitä kulkee laakerin ja eristeen läpi. Ajan saatossa nämä korkeataajuiset eristettä heikentävät läpilyönnit voivat mahdollistaa myös matalataajuisten kiertovirtojen kulun laakerin läpi [2].

Vaikka ehjä laakerieriste estää matalataajuisten virtojen kulun laakerin läpi tehokkaasti, ei se estä sähkömotorisen voiman indusoitumista koneen akselille. Tämän vuoksi segmentoidun sähkökoneen akselin matalaimpedanssinen maadoitus on tärkeää, ettei akselijännite kasva laakerin läpilyöntikestävyyttä suuremmaksi. Varsinkin suurilla koneilla tämä on tärkeää, sillä kaikki sähkökoneen epäsymmetrian ja segmentoinnin vaikutukset korostuvat sähkökoneen koon kasvaessa.

Koneen rungon koko tai pikemminkin akselin korkeus on tutkimuksissa osoittautunut noin kuutiollisesti verrannolliseksi indusoituneen akselijännitteen suuruuteen. Tärkein parametri akselijännitteiden pienentämiseksi on rungon halkaisijan suhde sen pituuteen. Suoravetoisissa kestomagneettitahtigeneraattoreissa on tyypillisesti suuri määrä napoja, mikä monesti johtaa suureen ilmavälin halkaisijaan, lyhyeen staattoriin ja ohueen

staattoriselkään. Tämä on paras yhdistelmä akselijännitteen indusoitumisen pienentämiseksi. [2, 11]

Edellä mainittujen syiden ohella akselijännitteen induktiiviseen tai kapasitiiviseen kytkeytymiseen löytyy monia muitakin aiheuttajia [10, 12], kuten:

- käämivauriot
- epäsymmetrinen syöttö
- sähköstaattiset ilmiöt:
    - ukkonen
    - hankauskitkat
- ilmavälin sähkö- ja magneettikentät
- magnetoitunut akseli
- magneettinen epäsymmetria:
    - epätasainen ilmaväli
    - roottorin epäkeskisyys
        - aiheuttaa syöttötaajuisen jäännösvuon, joka puolestaan saa akselille aikaan syöttötaajuisen akselivirran [13]
    - sähkökoneen linjausvirhe toimilaitteen kanssa
    - tuotantotarkkuus

Akselijännitteen amplitudille ei ole määrätty sähkökonestandardeissa raja-arvoja, mutta esimerkiksi IEC-standardi ehdottaa kokemukseen perustuen, ettei erillisille suojauslaitteille nähdä tarvetta, jos akselijännitteen huippu ei ylitä 500 mV. IEC-standardin mukainen akselijännite mitataan akselin päiden väliltä. Akselin päiden välisen jännitteen mittaaminen normaaleissa tuotanto-olosuhteissa voi tosin olla erittäin haastavaa, ellei mahdotonta. Standardi ei myöskään ota tarkemmin kantaa laakerivirtarajoihin, vaan lähinnä ohjaa oikeaoppiseen laakerivirtojen käsittelyyn. PSK-standardi antaa koneen akselin ja rungon välisen akselijännitteen jännitepulssin huippuarvosuositukseksi < 3 V, joka vaikuttaa hyvin alhaiselta rajalta suurille sähkökoneille. [6, 13]

2 LAAKERIVIRRAT SÄHKÖKONEISSA

Sähkökoneille ei pitäisi määrätä yleismaailmallisia laakerivirtarajoja, sillä koneiden laakerit eroavat toisistaan huomattavasti. Laakerin vierintäelimet joutuvat käytännössä kovan mekaanisen rasituksen kohteeksi johtuen roottorin massasta, epäkeskisyyden aiheuttamasta aksiaalisesta ja magneettisesta vedosta sekä kuorman aiheuttamista voimista. Kuormitus jakautuu laakereissa melko tarkasti vain kolmasosalle vierintäelimistä, jotka muuttavat kuormituksen vaikutuksesta elastisesti muotoaan. Kun koneen laakerit ja niiden käyttöolosuhteet tunnetaan, voidaan laakerin vierintäelinten ja -pintojen välille laskea Hertzin kontaktipinta A_{H}. Hertzin kontaktipinta voi olla hankala määritettävä, ja yleensä tämän tiedon saakin laakerin valmistajalta. Hertzin pinta-alasta on kerrottu lisää kappaleessa 2.5.3. Laakerivirta i_{b} ja Hertzin kontaktipinta vaikuttavat näennäislaakerivirrantiheyteen

$$J_{\mathrm{b}} = \frac{i_{\mathrm{b}}}{A_{\mathrm{H}}}. \text{ [4, 11, 14]} \tag{2}$$

Laakereille vahingollisista näennäislaakerivirrantiheyksistä on olemassa toisistaan hieman poikkeavaa kokemusperäistä tietoa, mutta verkkosyöttöisen sähkökoneen laakerivirrattiheyden ylittäessä arvon 0.1 – 0.4 A/mm^2, voidaan laakerin eliniän odottaa laskevan. On suositeltavaa, ettei näennäislaakerivirrantiheys ylitä arvoa 0.7 – 0.8 A/mm^2. Lisäksi paikallinen laakerivirrantiheys on osoittaunut eri tutkimuksissa paljon näennäistä laakerivirrantiheyttä suuremmaksi. Mikroskoopilla tutkitut näytteet ovat varmentaneet kraatereiden läpimitaksi ainoastaan 0.5 µm, kun laskettu Hertzin kontaktipinta on ollut luokkaa 3 mm^2. [14]

Edelliset näennäisvirrantiheysrajat ovat hyvin teoreettisia. Todellisuudessa tuulivoimalassa on paljon muuttuvia tekijöitä, jotka vaikuttavat sähkökoneen ja laakereiden toimintaan. Esimerkiksi sähkökoneen tärinä voi vaikuttaa laakerivirtojen kulkuun ja virrantiheyksiin. Yleensä sähkökoneet tärisevät säännöllisesti varsinkin pyörimisnopeuden taajuudella. Koneen tärinä heijastuu myös laakereihin, joiden

vierintäelimet liikkuvat ja Hertzin kontaktipinta vaihtelee. Tämä vaikuttaa suoraan laakerivirrantiheyksiin ja pitkällä aikavälillä laakereiden kestoikään.

Täytyy myös muistaa, että ennen laakerivirtojen aiheuttamaa laakerin hajoamista, laakerivirtojen olemassaolo voi ilmentyä lisääntyneenä meluna tai tärinänä sähkökoneessa. Lisäksi laakerivirrat aiheuttavat laakereissa ylimääräistä lämpenemistä ajan myötä [15]. Jos esimerkiksi generaattorin testauksessa laakerilämmöt ovat stabiloituneet tehdasolosuhteissa 70 asteeseen, ja tuulivoimakäytössä laakerilämmöt alkavat parin vuoden käytön jälkeen näyttää etävalvontalaitteilla 100 astetta, voidaan yhtä syytä hakea laakerivirtojen aiheuttamasta laakerivauriosta.

2.1 Kapasitiivisesti kytkeytyvät laakerivirrat

Tässä työssä on keskitytty suurten sähkökoneiden laakerivirtoihin, joissa induktiivisesti kytkeytyneet kiertävät laakerivirrat ovat kapasitiivisesti kytkeytyviä ei-kiertäviä laakerivirtoja dominoivampia ja vahingollisempia. Tässä kappaleessa kerrotaan kuitenkin kapasitiivisesti kytkeytyvistä laakerivirroista, joiden vaikutuksia ei voi väheksyä, kun sähkökoneen fyysinen koko pienenee ja induktiivisesti kytkeytyviä laakerivirtoja ei enää esiinny merkittävässä määrin.

Kuvassa 2 on esitetty kestomagneettitahtikoneen kapasitanssiverkon sijaiskytkentä korkeille taajuuksille. Laakerin yli vaikuttava jännite saa alkunsa koneen käämeissä vaikuttavasta yhteismuotoisesta jännitteestä ja on usein noin 5 – 20 % tästä jännitteestä [5, 18]. Sähkökoneen laakeriin kapasitiivisesti kytkeytyvän laakerijännitteen suuruutta voidaan ennustaa, kun tunnetaan yhteismuotoinen jännite ja koneen hajakapasitanssit tai paremminkin laakerijännitesuhde *Bearing Voltage Ratio*

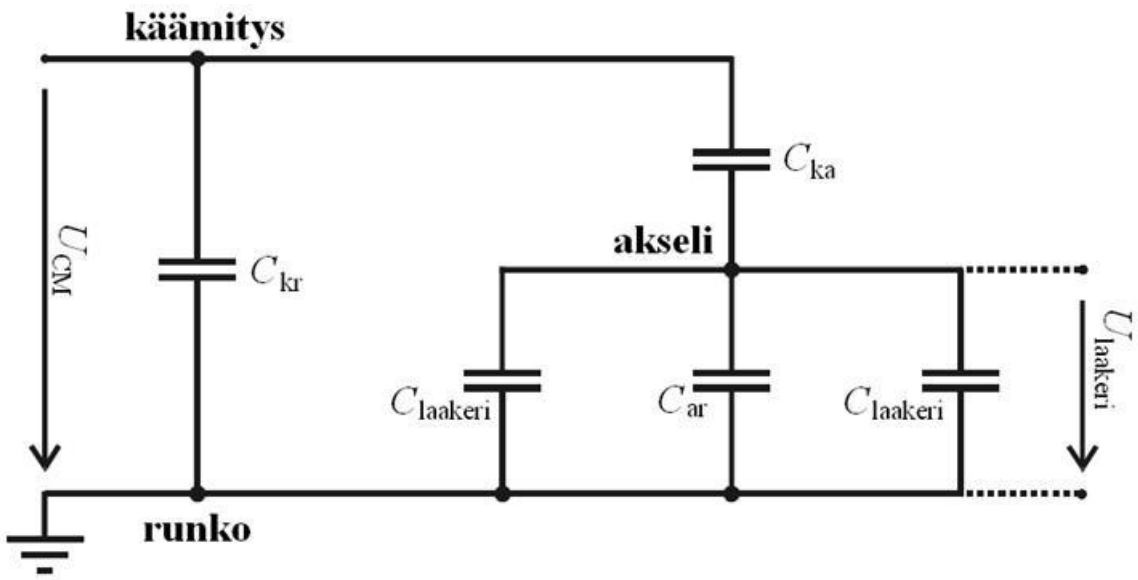
$$\mathrm{BVR} = \frac{U_{\mathrm{laakeri}}}{U_{\mathrm{cm}}} = \frac{C_{\mathrm{ka}}}{C_{\mathrm{ka}}+C_{\mathrm{ar}}+2C_{\mathrm{laakeri}}}. \text{ [19]} \tag{3}$$

Yhtälössä (3) U_{laakeri} on laakerin yli vaikuttava jännite, U_{cm} on koneen käämien yhteismuotoinen jännite, C_{ka} on käämin ja akselin (roottorin) välinen hajakapasitanssi,

C_{ar} on akselin ja rungon välinen kapasitanssi sekä $C_{laakeri}$ laakerin kapasitanssi. Yleensä sähkökoneen koon kasvaessa myös kapasitanssit kasvavat, sillä pinta-alat kasvavat suhteessa väliaineiden paksuuksia enemmän. Yksinkertaiselle levykapasitanssille C pätee yhtälö

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_{\mathrm{ins,\,r}} \frac{A}{d}, \tag{4}$$

jossa ε_0 on tyhjiön permittiivisyys, $\varepsilon_{\mathrm{ins,\,r}}$ on eristeen suhteellinen permittiivisyys, A on levykondensaattorin pinta-ala ja d on eristeen paksuus.



Kuva 2. Kestomagneettitahtikoneen hajakapasitanssien sijaiskytkentä, jossa C_{kr} on käämin ja rungon välinen kapasitanssi, C_{ka} on käämin ja roottorin (akselin) välinen kapasitanssi sekä C_{ar} on roottorin (akselin) ja rungon välinen kapasitanssi [4]

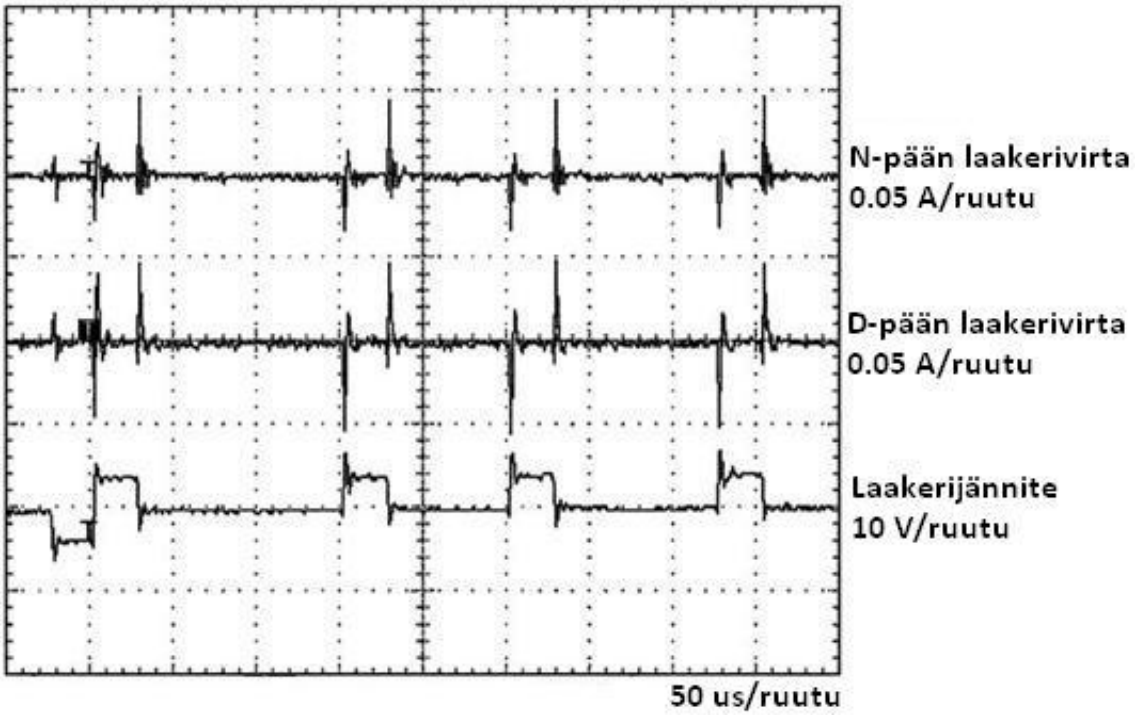
Kapasitiivisesti kytkeytyvillä laakerivirroilla tarkoitetaan laakerin läpi lyöviä laakerijännitteen purkautumisvirtoja. Laakeriin muodostuu hajakapasitanssi laakerin vierintäelimen noustessa laakerin voiteluaineen päälle. Laakerijännitteen vaikuttaessa, tämä laakerikapasitanssi varaa itseensä energiaa. Laakerikapasitanssiin latautuu energiaa, kunnes laakerin läpilyöntijännite ylittyy ja energia purkautuu laakerivirtana.

Näitä purkausvirtoja kutsutaan myös sähkökipinätyöstövirroiksi (EDM-virrat, Electric Discharge Machining). Laakerijännite voi latautua ja purkautua myös aiheuttamatta laakerivirtaa, mikäli laakerin läpilyöntikestoisuus ei ylity. Yleisenä voiteluaineen jännitekeston rajana voidaan pitää 15 V jännitepiikkiä mikrometrille voiteluainetta. Tyypillisesti laakereiden vierintäelinten ja -urien välissä on noin 0.2 – 2 µm voiteluainekerros. [16, 17]

Koneen hajakapasitanssien tarkka laskenta koneen suunnitteluvaiheessa on osoittautunut käytännössä hyvin vaikeaksi [4]. Laskennallisesti päästään todellisten kapasitanssien kanssa kuitenkin samoille dekadeille, mitä voidaan pitää riittävänä tarkkuutena. Esimerkiksi laakerieristeen mitoitusta varten olisi ensin suotavaa valmistaa sähkökone, minkä jälkeen siitä mitattaisiin tarkat kapasitanssin arvot, ja tämän jälkeen laskettaisiin laakerieristeelle optimaalinen paksuus.

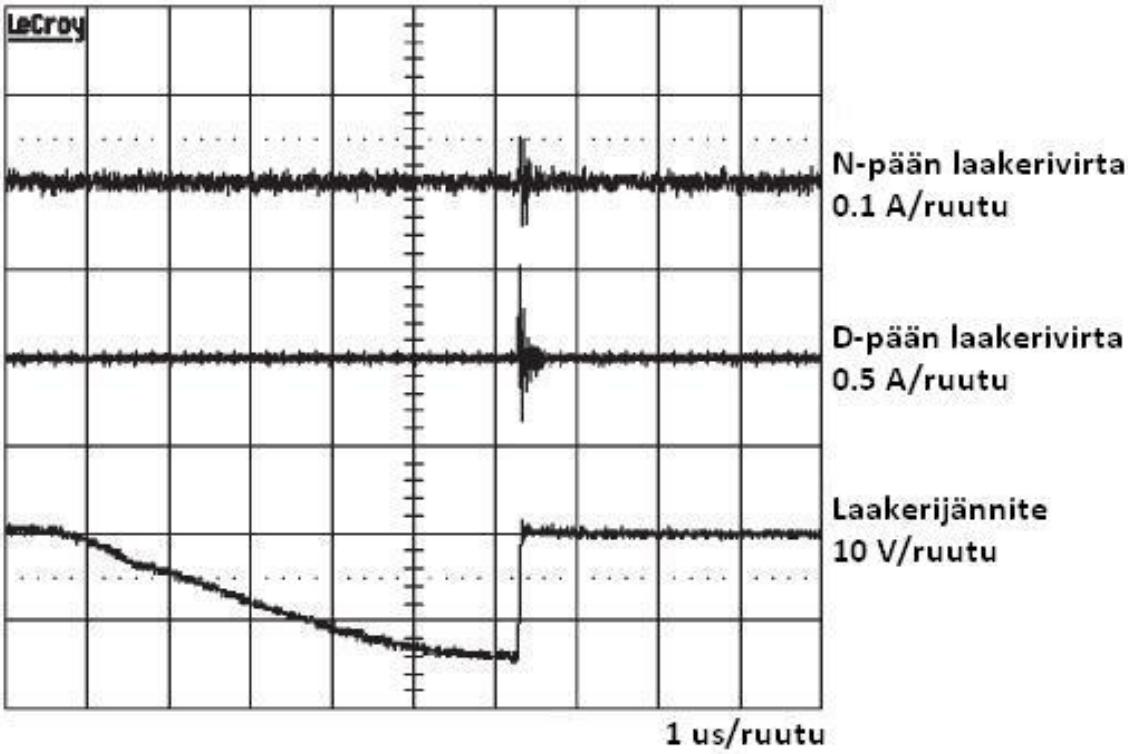
Kuvissa 3 ja 4 sekä teksteissä 1) ja 2) on havainnollistettu kapasitiivisesti kytkeytyvien laakerivirtojen ilmiötä. Tekstissä 1) on kerrottu pienistä kapasitiivisistä laakerivirroista sekä tekstissä 2) EDM-virroista.

1) Jännitteen suuret muutosnopeudet ($\mathrm{d}U/\mathrm{d}t$) laakerissa ja yhteismuotoinen jännite aiheuttavat pieniä kapasitiivisia laakerivirtoja. Nämä virrat ovat luokkaa 5 – 200 mA ja tästä syystä jätetään usein kaikissa konetyypeissä vähemmälle huomiolle. Kuvassa 3 on esitetty kapasitiivisten laakerivirtojen kulkeminen sähkökoneen molempien päiden laakereissa. Laakerijännitteen muutokset aiheuttavat läpilyöntejä laakereissa ja kapasitiiviset laakerivirtapiikit saavat huippuarvoksi noin 50 mA. Kuvan mittaustulos on saatu oikosulkumoottorista (110 kW, 400 V, 1500 rpm, rungon koko 280 mm, laakereiden lämpötila 35 °C). [11]



Kuva 3. Kapasitiiviset laakerivirrat 110 kW oikosulkumoottorin laakereissa [20]

2) Käämin korkeataajuinen yhteismuotoinen jännite aiheuttaa hajakapasitanssien verkon läpi laakerijännitteen yli laakerin. Kun tämä jännite kasvaa laakerin ja voiteluaineen kynnysjännitettä suuremmaksi, lyö se läpi aiheuttaen kipinätyöstöilmiön. Nämä 0.5 – 3 A purkaukset syövyttävät ajan myötä laakeripesän pintaa ja johtavat lopulta laakerin vaurioitumiseen. Kipinäpurkausten virrantiheys kasvaa moottorikoon pienentyessä [15]. Purkauksien toistuvuuteen vaikuttaa laakerijännitteen suuruus ja konvertterin kytkentätaajuus [6]. Kuva 4 havainnollistaa erinomaisesti tätä ilmiötä. Laakerijännitteen kasvaessa yli kynnysjännitteen, syntyy läpilyönti. Kuvan ilmiö havaittu 1 kW:n kestomagneettimoottorilla (400 V, 1500 rpm, rungon koko 80 mm, laakereiden lämpötila 25 °C). [11]



Kuva 4. Laakerivirran kipinäilmiö 1 kW kestomagneettimoottorin laakereissa [20]

Koneen pyörimisnopeudella on myös merkittävä vaikutus laakerivirtoihin koneen pyöriessä hyvin alhaisilla pyörimisnopeuksilla tai ei laisinkaan. Tällöin laakerin vierintäelimet eivät nouse voiteluainekerroksen päälle tai voiteluainekerros jää hyvin ohueksi. Tämä johtaa siihen, että vierintäelimen ja laakerikehien välisten kapasitanssien arvot ovat hyvin suuria tai kapasitanssia ei muodostu lainkaan, jolloin laakeri on lähes resistiivinen. Näissä tilanteissa korkeataajuiset virrat kulkevat varsin helposti laakerin läpi. Toisaalta laakerikehien ja vierintäelimien galvaaninen kytkeytyminen toisiinsa vähentää kipinätyöstön mahdollisuutta laakerissa.

2.2 Induktiivisesti kytkeytyvät laakerivirrat

Induktiivisesti kytkeytyvät laakerivirrat ovat suurissa sähkökoneissa vaikuttavista laakerivirroista merkittävimpiä. Tämä johtuu siitä, että käämien koon kasvaessa myös käämin ja staattoripakan välinen kapasitanssi kasvaa. Kun käämeissä vaikuttavan

korkeataajuisen yhteismuotoisen jännitteen muutosnopeus dU/dt on suuri, karkaa käämeistä staattorirautaan vuotovirtaa virtaa yhtälön

$$I_{\mathrm{CM}} = C_{\mathrm{kr}} \frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

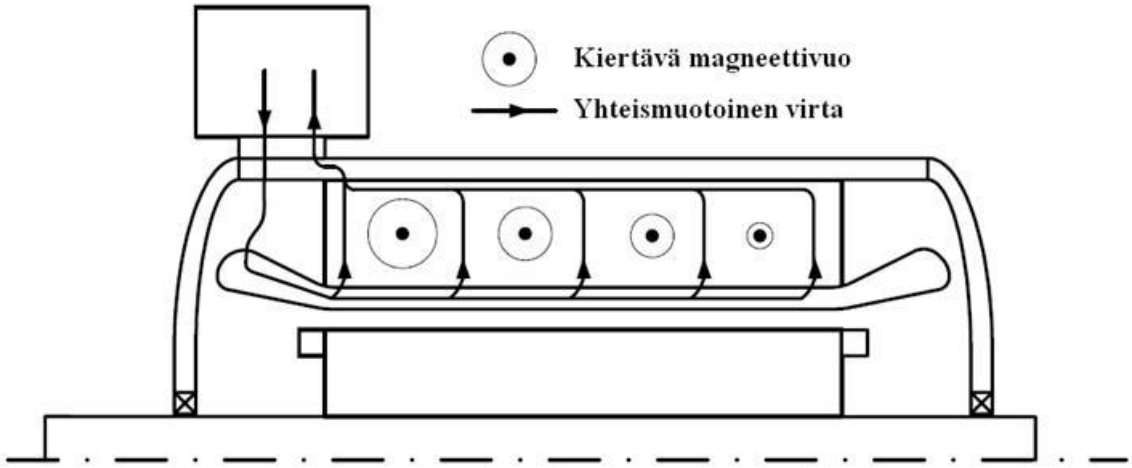
mukaisesti. Yhtälössä (5) I_{CM} on yhteismuotoinen virta, dU on jännitteen muutos aikavälillä dt sekä C_{kr} on käämin ja rungon välinen kapasitanssi. Tätä vuotovirtaa kutsutaan yhteismuotoiseksi virraksi tai maadoitusvirraksi, jonka pitäisi kulkea staattoripakasta ja rungosta koneen suojamaa- eli PE-pisteeseen ja maadoittua lähteeseen. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu tämän virran ympärilleen luoma magneettivuo sekä tämän virran vuotaminen käämeistä, mitkä molemmat tapahtumat luovat koneen magneettivuohon epäsymmetriaa. [5, 21]

Kun käämiin menevä ja käämistä tuleva virta eivät ole yhtä suuret, muodostuu käämin eri päiden välille eri suuri magneettivuo. Kuva 5 havainnollistaa käämivirtaepäsymmetrian ilmiötä. Kun kaikissa koneen staattoriin symmetrisesti jaetuissa käämeissä tapahtuu sama ilmiö, aiheuttaa epäsymmetria staattorirautaa kiertävän korkeataajuisen magneettivuon. Tämä muuttuva magneettivuo indusoi sähkökoneen akselille Faradayn induktionlain mukaisesti jännitteen. Kun koneen staattoripakan molemmissa päissä vaikuttaa eri suuruinen korkeataajuinen magneettivuo, aiheuttaa se potentiaalieron akselin päiden välille. Tämä potentiaaliero muuttuu johtavalla akselilla luonnollisesti virraksi, joka pyrkii kiertämään koneessa rinkiä laakereiden, akselin ja rungon ympäri. Akselille indusoitunut jännite muistuttaa muodoltaan yhteismuotoista jännitettä. Jos näin ei tapahdu, voi se olla seurausta esimerkiksi asennusvirheestä, laakerin voiteluaineen johtamisesta tai vioittuneesta laakerista. Pienemmillä sähkökoneilla akselille indusoituneen jännitteen amplitudi on niin pieni, ettei se aiheuta läpilyöntiä laakerin läpi. [1, 21, 22, 39]

On tutkittu, ja mittauksilla todennettu, että laakerikiertovirta i_{bcc} on tyypillisesti kahdella normaalilla laakerilla varustetuissa sähkökoneissa noin 0.3-kertainen verrattuna maadoitusvirtaan i_{ec}. Jos maadoitusvirta vastaa koneen yhteismuotoista virtaa, voi se saada Mützen mukaan [5] esimerkiksi arvon

$$i_{\mathrm{ec}} = I_{\mathrm{CM}} = 900\ \mathrm{nF} \cdot \frac{0.5\ \mathrm{kV}}{\mu\mathrm{s}} = 450\ \mathrm{A}. \tag{6}$$

Induktiivisesti kytkeytyneen kiertolaakerivirran voidaan näin arvioida olevan 135 A. Tämä on vaarallisen suuri virran arvo, vaikka sähkökoneen laakerit olisivat kuinka suuret ja pienentäisivät tällä tavalla näennäislaakerivirrantiheyttä. [4, 11, 12]



Kuva 5. Kuvassa on havainnollistettu vuotovirtojen eli yhteismuotoisen virran vuotaminen käämeistä sähkökoneen runkoon sekä käämeissä kulkevaa virtaa vastaavat magneettivuot [2]. Koska käämiin menevä virtasumma on suurempi kuin siitä poistuva, muodostuu oikean käden säännön mukaisesti staattorikäämiä kiertävä magneettivuo.

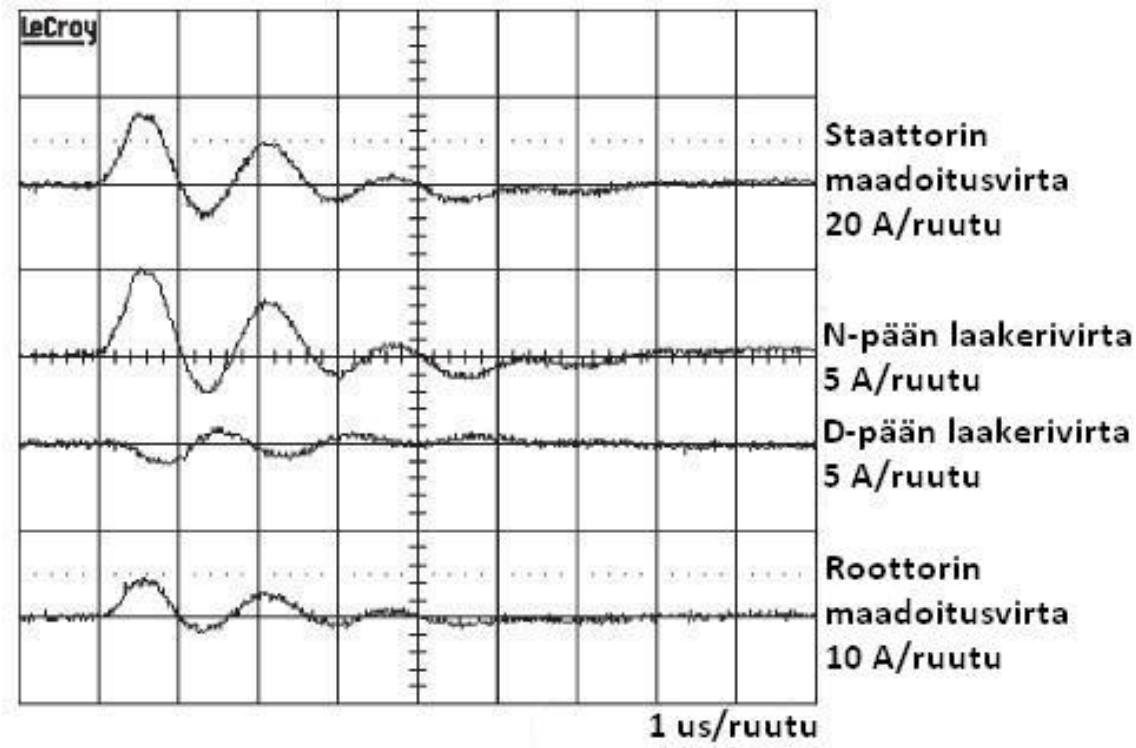
Ainoastaan käämeissä kulkeva virta ei aiheuta virtaepäsymmetriaa, vaan myös käämeistä runkoon vuotava virta saa aikaan sitä kiertävän magneettivuon Amperen lain mukaisesti. Nämä vuot joko vahvistavat tai heikentävät kiertovirtailmiötä riippuen siitä, mihin suuntaan koneessa kulkevat. Näiden voiden vaikutusta erikseen on hankala arvioida, sillä koneet ovat yksilöitä ja tulevaa sähkökoneen asennustapaa tuulivoimalaan ei välttämättä tunneta konetta valmistettaessa. Edellä laskettiin kiertävä laakerivirta kertomalla maadoitusvirtaa kokemusperäisellä kertoimella. Tämä mittauksiin perustuva kerroin ottaa huomioon myös vuotovirtojen aiheuttamien magneettivoiden vaikutukset kiertovirtoihin. Tutkimuksissa on lisäksi osoitettu että, jos sähkökoneessa on:

- yksi eristetty laakeri; $i_{bcc} \leq 0.2 \cdot i_{ec}$
- kaksi eristettyä laakeria; $i_{bcc} \leq 0.1 \cdot i_{ec}$
- yksi tai kaksi keraamisin vierintäelimin varustettua laakeria; $i_{bcc} \approx 0$. [11]

Kiertovirtojen ehkäisemiseen on käytetty myös menetelmää, jossa käämi on jaettu kahteen rinnakkaiseen osaan niin, että staattorin toisesta päästä tulee toinen syöttö ja vastakkaisesta päästä toinen. Jos oletetaan, että vuotovirrat käämistä staattoriin jakautuvat tasaisesti rinnakkaisten haarojen välillä, kompensoituu magneettinen epäsymmetria teoriassa. [23]

2.3 Roottorin maadoitusvirrat

Jos roottorilla on staattoria matalaimpedanssisempi reitti maahan, osa koneen maadoitusvirrasta voi kulkea roottorimaadoituksen ja laakereiden läpi. Nämä laakerivirran amplitudit voivat olla hyvinkin korkeita ja haitallisia moottorin koon kasvaessa. Kuva 6 havainnollistaa, kuinka osa maadoitusvirrasta kulkee laakereiden läpi ja maadoittuu roottorista (500 kW oikosulkumoottori, 400 V, 3000 rpm, rungon koko 400 mm, laakereiden lämpötila 70 °C). [8, 11]



Kuva 6. Roottorin maadoitusvirran aiheuttamat laakerivirrat 500 kW:n oikosulkumoottorin laakereissa [20]

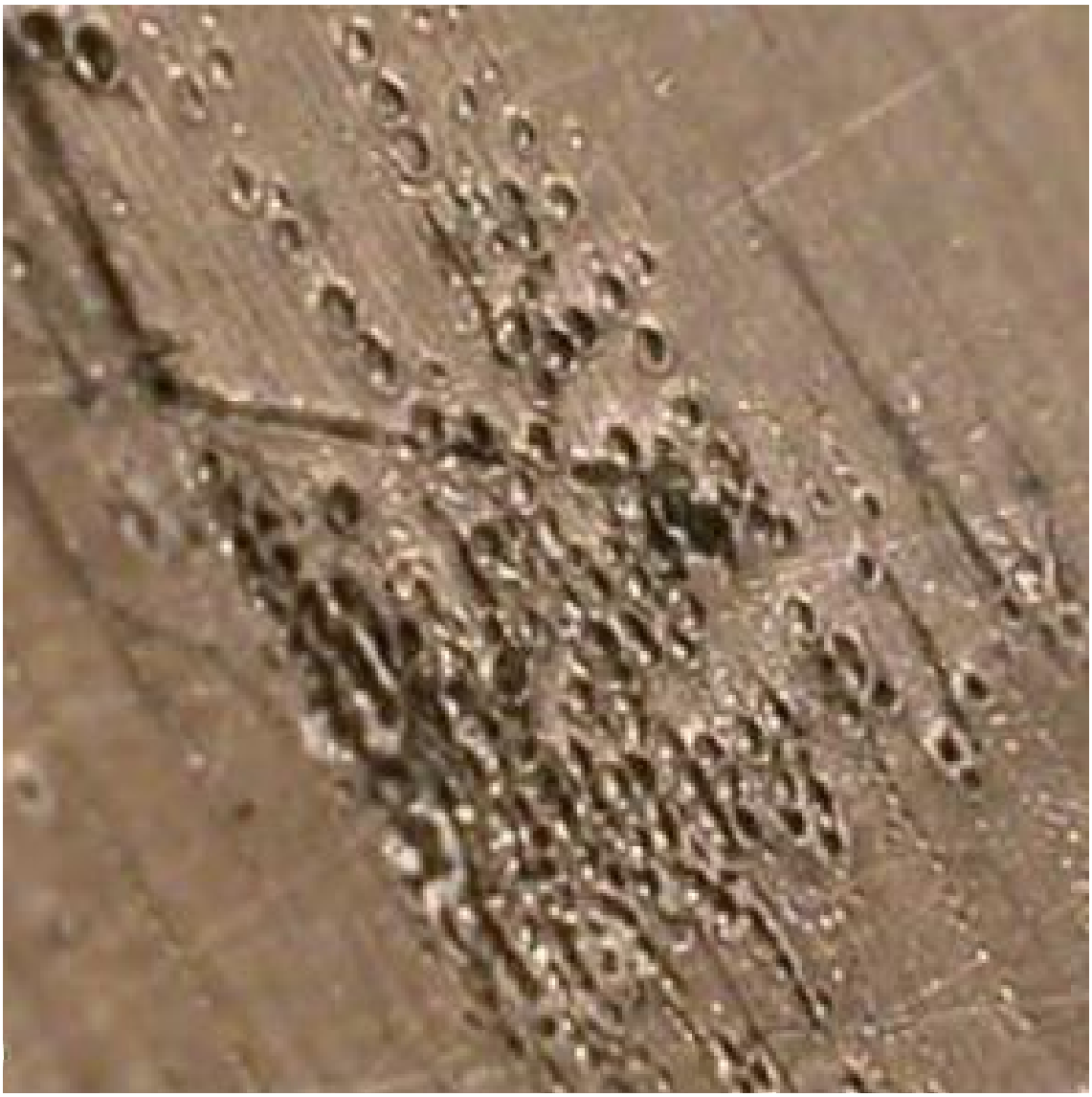
2.4 Laakerivirtojen vaikutus laakeriin

Tässä kappaleessa eritellään esimerkkikuvin tyypillisimpiä laakerivirtavaurioita. Laakerivirrat aiheuttavat näkyviä vaurioita sekä laakerin vierintäpinnoille että vierintäelimiin.

Sähköinen syöpyminen voi aiheuttaa laakeripesien pinnalle esimerkiksi kraaterimaisia koloja, kuten kuva 7 havainnollistaa. Nämä kolot ovat yleensä läpimitaltaan 0.5 µm – 0.5 mm. Kun laakerivirta sulattaa reikiä laakeripesien pinnalle, kraaterista irtoavat metallihiukkaset siirtyvät laakerin voiteluaineeseen [13]. Tämä heikentää voiteluaineen ominaisuuksia. Sähköisessä mielessä metallihiukkaset eristävässä laakerirasvassa heikentävät sen läpilyöntikestävyyttä. Mekaanisesta näkökulmasta karkeampi rasva ei voitele laakeria suunnitellulla tavalla ja aiheuttaa laakerin osiin mekaanista kulumista. [4]

Laakerivirrat muuttavat laakeria sekä mekaanisilta että metallurgisilta ominaisuuksiltaan. Laakerivirran sulattama kraateri kovettuu, mutta jää paljon

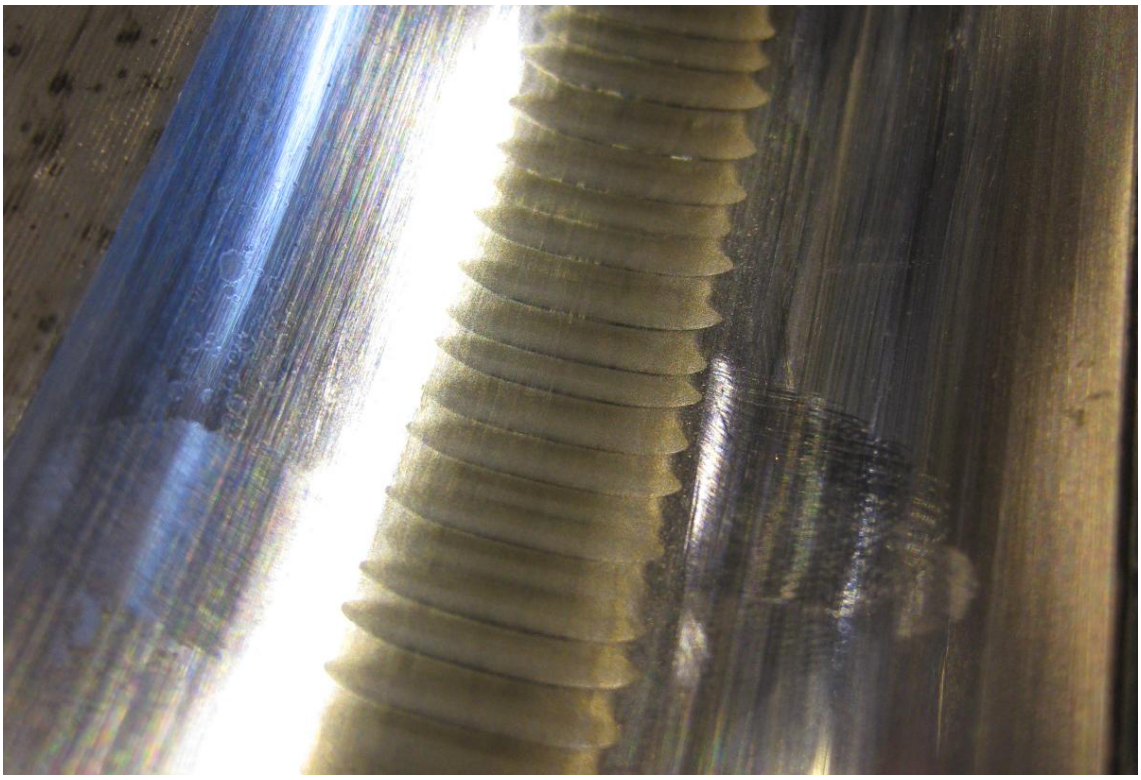
alkuperäistä materiaalia hauraammaksi. Hauraan pintakerroksen alapuolinen materiaali jää hitaasta jäähtymisestä johtuen alkuperäistä materiaalia pehmeämmäksi. Tämä heikentää muutenkin koville rasituksille altista laakeria. [24]



Kuva 7. Laakerivirtojen aiheuttamia kraatereita laakeripesän pinnalla [25]

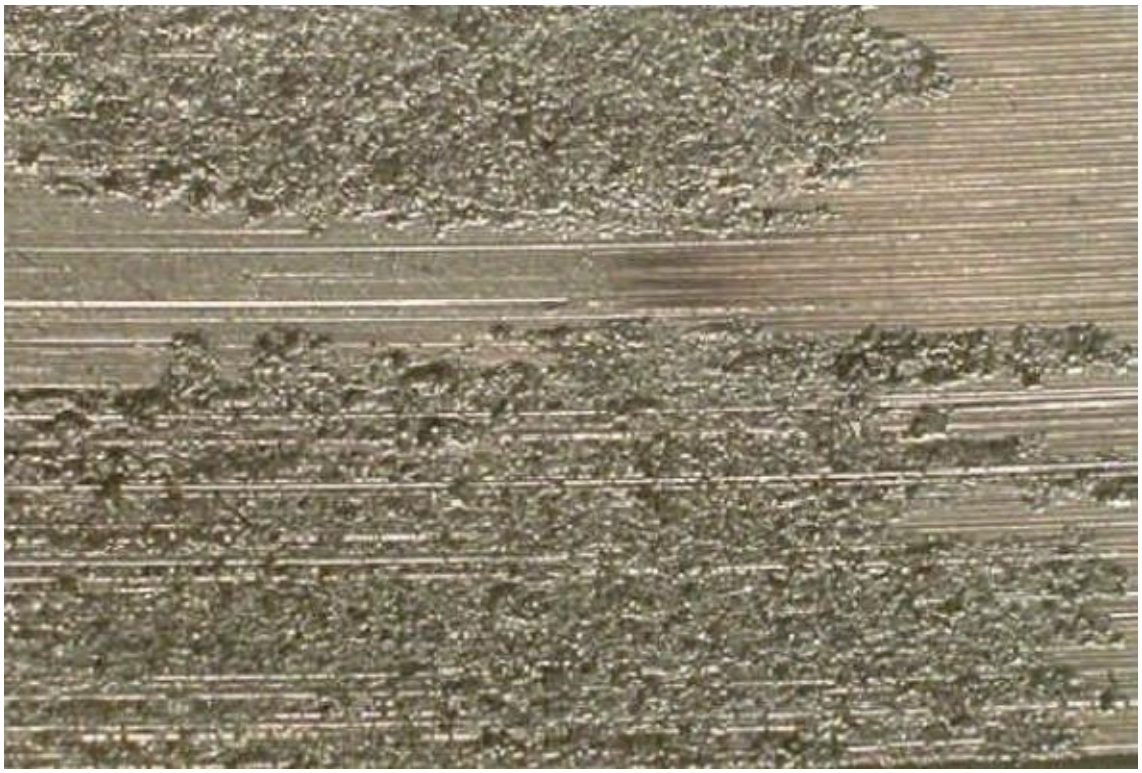
Kun laakerin pinnalle on syntynyt tarpeeksi kraatereita, vaikuttavat ne laakerin vierintäelinten liikeratoihin häiritsevästi. Tästä syntyvä mekaaninen resonanssitärinä aiheuttaa pyörivän sähkökoneen laakereihin pyykkilautamaisen kuvion. Se näkyy laakeripesissä vierintäsuuntaan poikittaisena kuviona. Täytyy muistaa, että tällaisen

kuvion voi aiheuttaa myös laakereiden kokema mekaaninen tärinä, joka ei välttämättä johdu laakerivirroista. Kuvassa 8 on esitetty ahvenraitakuviota eräässä laakerissa. [1, 13, 24]

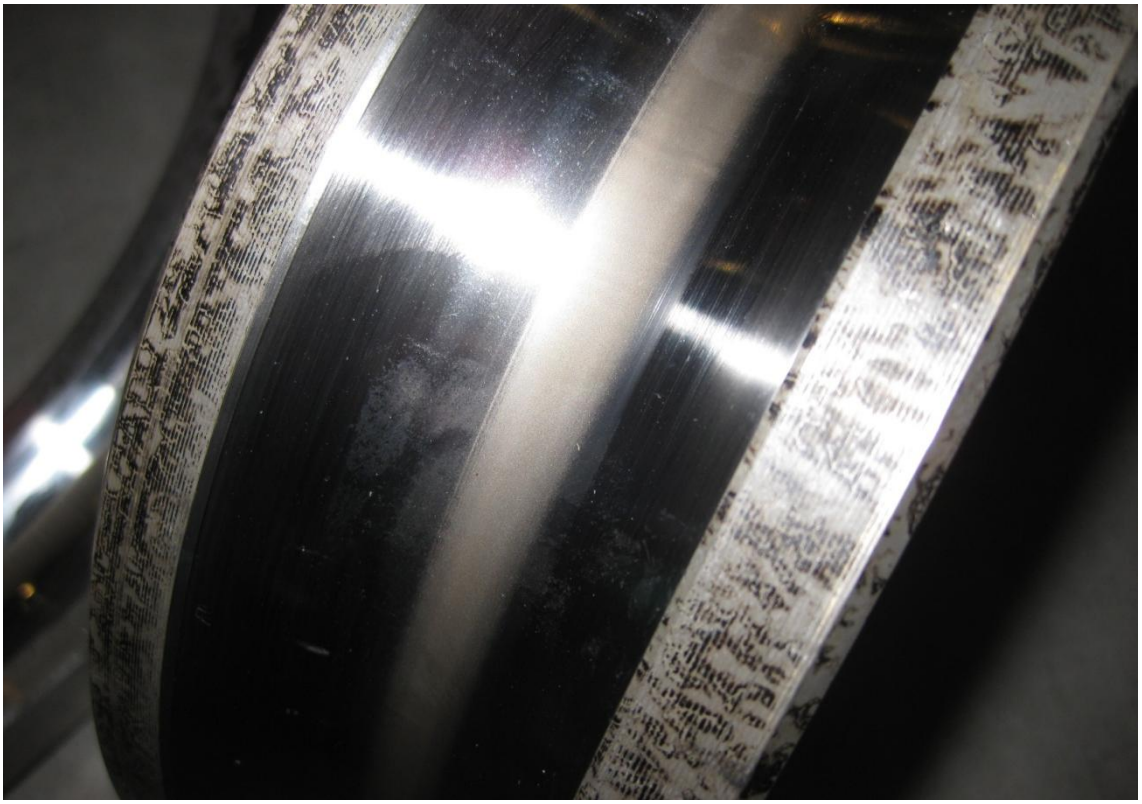


Kuva 8. Sähkökoneen laakerin aaltoiluvaurio, jonka laakerivirrat ovat voineet aiheuttaa

Laakeripesän harmaantumisilmiö voi syntyä, jos laakereiden voiteluaine menettää eristyskykynsä ja laakeri voidaan ajatella resistiiviseksi. Tässä tapauksessa virrantiheydet ovat matalia, eikä voida puhua varsinaisista läpilyönneistä. Laakerivirta syövyttää silti ajan myötä laakerin pinnan karheaksi. Tälläinen voi johtua esimerkiksi virheellisestä maadoituksesta. Kuvissa 9 ja 10 on esitetty kyseisen ilmiön seuraukset laakerin vierintäpinnalle. Kuvan 9 pienen pienet kraaterit ovat halkaisijaltaan noin 0.5 – 8 µm. [11, 14, 24]



Kuva 9. Laakeripesän harmaantuminen laakerivirran jatkuvasta vaikutuksesta [25]



Kuva 10. Laakerivirran aiheuttamaa harmaantumisilmiötä

Laakerivirrat eivät vaikuta laakerin vierintäelimiin niin voimakkaasti kuin vierintäpintoihin. Kuvassa 11 on esitetty tyypillinen laakerivirran ilmentymä laakeripalloissa. Pallot himmenevät tai harmaantuvat laakerivirran vaikutuksen alaisena. Kuvassa 11 himmeneminen on selkeää, sillä laakeripallojen tulisi olla aivan kirkkaita.

Kuva 11. Laakerivirran vuoksi himmentyneet laakeripallot

Laakerivirroilla on myös suuri vaikutus laakerin voiteluaineeseen. Läpilyönnit aiheuttavat korkeita lämpötiloja, jolloin lisäaineet ja pohjaöljy reagoivat. Pohjaöljy palaa ja hiiltyy. Voiteluaineen lisäaineet kuluvat nopeasti loppuun. Voiteluaineen lisäaineet edistävät öljykerroksen muodostumista laakereihin varsinkin hitailla pyörimisnopeuksilla. Jos lisäaineet kuluvat loppuun, ei kunnon eristyskerrosta synny, ja laakerin vioittuminen on todennäköistä. [24]

2.5 Laakerin vaikutus laakerivirtoihin

Käytettävällä laakerilla on omat vaikutuksensa sen läpi kulkeviin laakerivirtoihin. Seuraavissa kappaleissa eritellään laakerin vaikutusta laakerivirtoihin.

2.5.1 Laakerin voiteluaineen vaikutus laakerivirtoihin

Laakerin voiteluaineella on suuri vaikutus laakerin eristävyyteen. Sähköisessä mielessä laakerin voiteluaineena voidaan käyttää hyvin eristävää tai johtavaa ainetta. Johtavan voiteluaineen käytöstä kerrotaan lisää kappaleessa 3.3.2. Usein laakerin voiteluaineen halutaan eristävän laakerivirtoja mahdollisimman tehokkaasti. Voiteluaineen pääasiallinen tehtävä on kuitenkin suojella pyörivää laakeria mekaaniselta kulumiselta. Voiteluaineen voitelevuuden ja eristävyyden väliltä täytyy yleensä löytää kompromissi.

Eristävyyteen vaikuttaa vahvasti sähkökoneen pyörimisnopeus. Kun kone seisoo paikallaan tai pyörii erittäin hitaasti, ei laakerin vierintäelimen ja -uran väliin jää juuri voiteluainetta. Tällöin laakeri voidaan käsittää sähköisessä mielessä ennemmin metallisen kontaktin resistanssina kuin kapasitanssina. Sähkökoneen nopeuden kasvaessa vierintäelin nousee voiteluaineen päälle muodostaen ohuen eristyskerroksen laakerin vierintäelimen ja -uran välille. Voiteluaineen kemiallinen koostumus, sähkökoneen nopeus sekä laakerin malli, koko ja lämpötila vaikuttavat siihen, kuinka paksu kerros voiteluainetta jää pyörivän elementin ja vierintäuran välille ja kuinka suureksi kapasitanssi laakerissa muodostuu. Laakerilämpötilan kasvaessa laakerin voiteluaine notkistuu ja sen eristyskerroksen paksuus pienenee. [1, 26]

2.5.2 Laakerin laadun vaikutus laakerivirtoihin

Suojaamattoman laakerin läpilyöntikestoisuuteen vaikuttaa omalta osaltaan laakerin osien viimeistely. Kun vierintäpinnat ovat todella sileitä, on niillä teoriassa suurempi jännitekestoisuus, kuin ”karheapintaisilla” laakereilla. [1, 23]

Asiaa voidaan ajatella myös toiselta kantilta. Kun pinta on epätasainen, ei läpilyöntiin tarvita niin suurta jännitettä. Näin läpilyöntejä tapahtuu tiheämmin, mutta

läpilyöntijännite ei kasva niin korkeaksi kuin sileäpintaisilla laakereilla ja virrantiheydet pysyvät matalampina. [23]

2.5.3 Laakerimallin ja -koon vaikutus laakerivirtoihin

Laakereita on monia eri malleja. Laakerivirtojen kannalta tärkein parametri on laakerin vierintäelinten ja pintojen välinen Hertzin kontaktipinta. Tämä määrittelee pääosin laakerivirtojen aiheuttaman laakerivirrantiheyden suuruuden. Jos laakeri on tarpeeksi suuri, ei monien ampeerien virtakaan välttämättä ylitä kappaleessa 2 esiteltyä 0.1 A/mm^2 virrantiheysrajaa.

Hertzin pinta-alaan vaikuttavia tekijöitä [4]:

- laakerin malli
    - rulla-, pallo- vai liukulaakeri
- laakerin koko
    - vierintäelimien koko ja määrä
- mitä materiaaliseosta laakeri on
    - miten paljon eri osat painuvat elastisesti toisiaan kohti
- miten suuren rasituksen alaisena laakeri toimii
    - radiaalinen ja aksiaalinen rasitus sekä radiaalinen heitto
        - missä olosuhteissa ja asennoissa laakeri toimii

3 LAAKERIVIRTOJEN EHKÄISYMENETELMÄT

Sähkökäytöissä esiintyviä laakerivirtoja pyritään luonnollisesti ehkäisemään tai pienentämään. Parhaisiin tuloksiin päästään yhdistelemällä eri ratkaisuja. Tässä kappaleessa perehdytään laakerivirtojen ehkäisymenetelmiin. Pääpaino diplomityössä on sähkökoneeseen tehtävissä muutoksissa. Konvertteriin tehtäviä mahdollisia muutoksia ja oikeaoppista kaapelointia on sivuttu lyhyesti. Lisäksi on hyvä muistaa, että muualla tuulivoimakäytössä tehtävät muutokset vaikuttavat usein koko ketjuun. Esimerkiksi sähkökoneen laakereista ehkäistyt kiertovirrat voivat kulkeutua tuhoisasti vaihteistoon. Sähkökoneeseen tehtävien suojausratkaisujen perusperiaatteet pätevät myös muualla sähkökäyttöketjussa.

3.1 Konvertterin muutokset

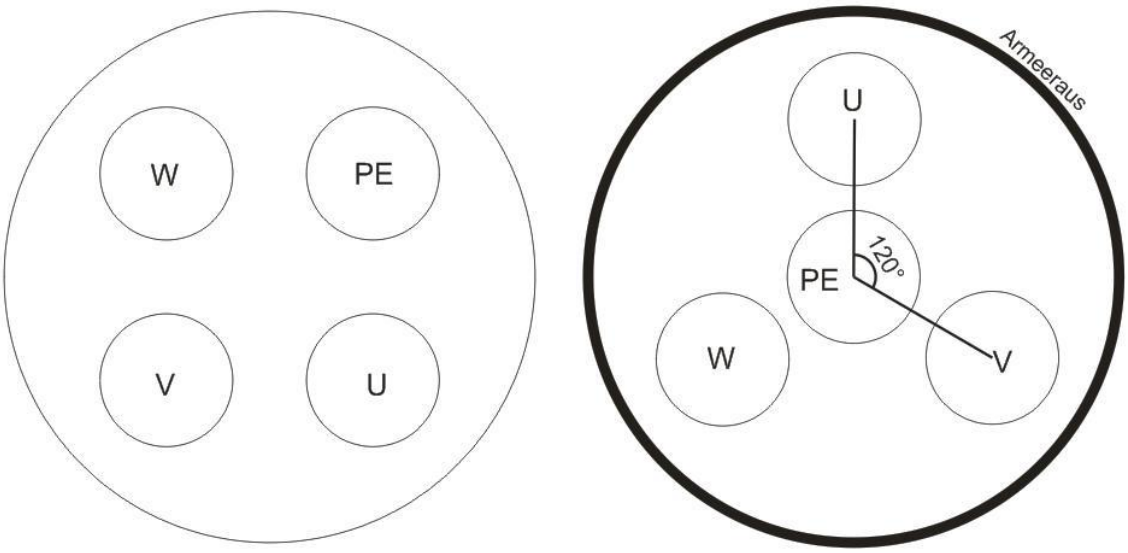
Sähkökonetta syöttävään konvertteriin voidaan tehdä monenlaisia muutoksia yhteismuotoisen virran ja -jännitteen vähentämiseksi sekä sähkökoneen terminaalien ylijännitteen pienentämiseksi. Mahdollisia ratkaisuja ovat esimerkiksi erilaiset suodattimet, konvertteritopologiat, modulointitekniikan tai kytkentätaajuuden muutokset. Edellä mainittujen menetelmien on todettu toimivan tehokkaasti laakerivirtojen ehkäisyssä [2, 22, 27], mutta ne ovat diplomityön aiheen ulkopuolella ja jäävät tarkemmin käsittelemättä. Jos esimerkiksi passiivisten suodatinten halutaan toimivan tehokkaasti, on niiden komponentit monesti viritettävä jokaiselle moottorille erikseen yksilöllisin parametrein. [26]

Kappaleen 4.2.6 mittauksissa on vertailtu invertterin modulaattorityypin ja kytkentätaajuuden vaikutusta yhteismuoto- ja kiertovirtaan. Nämä mittaukset toimivat lähinnä palautteena diplomityötä rahoittaneen yrityksen tuotekehitysosastolle jo käytössä olevien tekniikoiden vertailuna, eikä niinkään laakerivirtojen vaimennusideointina. Toki näistäkin tuloksista nähdään, mitkä modulaattorityypin ja kytkentätaajuuden yhdistelmät toimivat kiertovirtojen näkökulmasta parhaiten testatulla kestomagneettitahtikoneella.

3.2 Kaapelointi

Jos sähkökonetta syötetään kaapelilla, jossa kaikki kolme vaihetta ja PE-johdin ovat saman kaapelivaipan sisällä, on ehdoton vaatimus käyttää symmetrisiä kaapeleita. Epäsymmetriset kaapelit aiheuttavat taajuusmuuttajakäytöissä korkeataajuisen jännitteen indusoitumisen PE-johtimeen muista johtimista. Näin ei haluta käyvän, sillä PE-johdin on kiinni sähkökoneen rungossa ja voi näin aiheuttaa rungon potentiaalin heilahteluja. Rungon potentiaalin muutokset voivat puolestaan aiheuttaa laakerivirtoja.

Lisäarvoa kaapeloinnille antaa kaapelin armeeraus, joka poistaa ympäristöstä ja ympäristöön indusoituvat häiriöt. Kuvassa 12 on esitetty vasemmalla epäsymmetrinen armeeramaton kaapeli sekä oikealla symmetrinen armeerattu kaapeli. Armeerauksessa tulisi käyttää kuparia tai alumiinia, jotta riittävän matalaimpedanssinen reitti korkeille taajuuksille taataan. PE-johtimen tai -johtimien sijoittelun voi kaapeliin toteuttaa melko vapaasti, kunhan se on tehty symmetrisesti. Armeeraus kiinnitetään mahdollisimman lyhyellä suurtaajuusliitoksella sähkökoneen ja konvertterin PE-pisteeseen. Parasta olisi käyttää aina niin kutsuttua 360° liitosta, [6, 7] joka tarkoittaa sitä, että kaapelin konsentrinen ulkojohdin liitetään runkoon koko kehältään.



Kuva 12. Vasemmalla suojaamaton epäsymmetrinen kaapeli, jollaista ei saa käyttää ja oikealla armeerattu symmetrinen kaapeli, jonka käyttöä suositellaan. U, V ja W merkitsevät kolmea eri vaihetta. PE on suojamaa (protective earth)

Sähkökoneen syöttökaapeleiden tulisi olla mahdollisimman lyhyitä, jotta jännitteen heijastumisesta johtuvat ylijännitteet saadaan pidettyä alle kaksinkertaisina. Lyhyt on melkoisen epämääräinen käsite, mutta nyrkkisääntönä voidaan pitää syöttökaapelin kriittistä pituutta

$$L_{\mathrm{kr}} = \frac{t_{\mathrm{r}} v}{2} = \frac{t_{\mathrm{r}}}{2} \frac{c}{\sqrt{\mu_{\mathrm{r}} \varepsilon_{\mathrm{r}}}} = \frac{100\ \mathrm{ns}}{2} \frac{300\ \mathrm{m/\mu s}}{\sqrt{1 \cdot 4}} = 7.5\ \mathrm{m}, \tag{7}$$

joka perustuu oletettuun jännitepulssin etenemisnopeuteen v ja jännitteen nousuaikaan t_{r}, joka voi suurella IGB-transistorilla olla 100 ns luokkaa. Jännitepulssin etenemisnopeuden määrittelee pääasiassa kaapelin eristeen suhteellinen permittiivisyys ε_{r} (tässä käytetty 4). Muut yhtälössä (7) käytetyt muuttujat ovat valon nopeus c ja kaapelieristeen suhteellinen permeabiliteetti μ_{r}. [1]

Kun käytetään lyhyitä kaapeleita ja päätetään armeerauksen molemmat päät 360° liitoksella, muodostuu kaapelista itsestään yhteismuotovirralle imuvirtamuuntaja, jolloin saadaan korkeataajuisen yhteismuotoisen jännitteen synnyttämä yhteismuotoinen virta kulkemaan varsin tehokkaasti takaisin konvertterille sähkökoneen asemesta. Liian pitkillä syöttökaapeleilla voi yhteismuotoinen jännite moottorin tai generattorin terminaaleissa nousta pahimmassa tapauksessa jopa nelinkertaiseksi. [1, 28] Kaapelipituutta ei voida kuitenkaan läheskään aina valita yllä laskettua arvoa lyhyemmäksi, joten käytännössä joudutaan hyvin usein toimimaan niin sanottujen pitkien kaapeleiden kanssa.

3.3 Sähkökoneen muutokset

Sähkökoneita on jotenkin muokattava, jotta laakerivirtojen aiheuttamat vahingot laakereille saadaan minimoitua. Tämä voi tarkoittaa ulkoisia lisälaitteita, koneen osien modifiointeja tai rakennemuutoksia. Yleensä laakerivirtojen ehkäisy ja vaimentaminen aiheuttaa lisäkustannuksia.

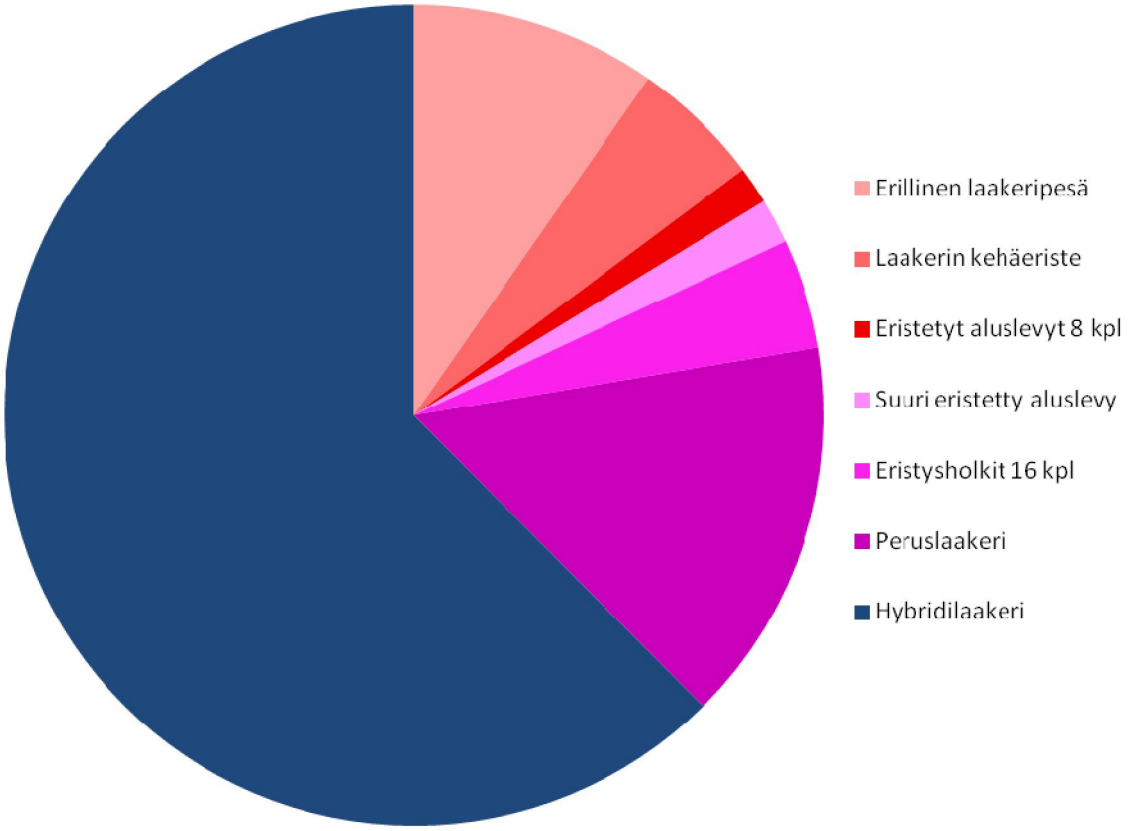
3.3.1 Hybridilaakerit

Keraamiset laakerit eli hybridilaakerit ovat sähköisessä mielessä paras ratkaisu laakerivirtaongelmiin. Hybridilaakereissa käytetään eristäviä, keraamisia vierintäelimiä, jolloin laakerin ulko- ja sisäkehän välinen kapasitanssi jää pieneksi. Hybridilaakerit estävät käytännössä laakerivirran kulun laakereiden läpi eristävyytensä ja pienen kapasitanssinsa (koosta riippuen noin 40 pF [30]) vuoksi. Metalli-metalli-kontaktia ei koskaan synny, eikä laakerivirtaongelmaa hybridilaakereilla edes ole olemassa. Hybridilaakerit ovat monilta mekaanisiltakin ominaisuuksiltaan normaaleja laakereita parempia. Arvatakin saattaa, että ainoa rajoittava tekijä hybridilaakereihin siirtymisessä on niiden korkea hinta. Niiden hinnat ovat tällä hetkellä tuulivoimageneraattoreiden kokoluokassa noin 4-6 kertaisia peruslaakereiden hintoihin verrattuna, ja tämä rajoittaa niiden käyttöä haettaessa teknillis-taloudellista ratkaisua.

Täytyy tosin muistaa, että luultavasti normaali laakerikin on eristettävä jonkinlaisella ratkaisulla. Se voi tarkoittaa esimerkiksi pinnoitettua laakeria (kappale *Laakerin pinnoitus*) tai peruslaakerin pesäeristystä (kappale *Laminaattieristys*). Pesäeristystä käytettäessä, on koneeseen hankittava monia erimallisia eristeitä, mikä vie aikaa ja aiheuttaa kustannuksia:

- suunnittelu-/muutostyöt
- ostotilaukset
- logistiikka
- monimutkaisempi kokoonpano

Kuvassa 13 on esitetty sektorisuhteina esimerkki erääseen tuulivoimageneraattoriin toteutettavasta pesäeristyksestä normaalilla laakerilla sekä vaihtoehtoisesta laakeroinnista hybridilaakerilla. Kuten jakaumasta havaitaan, tulee hybridilaakeri ainoastaan sähkökoneen toiseen päähän yksinään kalliimmaksi kuin pesäeristykset ja normaali laakeri yhteensä.



Kuva 13. Hintavertailua hybridilaakerin sekä normaalin laakerin ja pesäeristysten välillä

3.3.2 Johtava laakerin voitelu

Johtavan laakerirasvan käyttö laakerivirtojen ehkäisyyn perustuu siihen, ettei jännitettä pääse muodostumaan eikä läpilyöntejä tapahdu, vaan virran annetaan kulkea tarkoituksellisesti laakerin läpi. Teoriassa idea on hyvä. Ongelmaksi kuitenkin muodostuu johtavan laakerirasvan käyttö sen päätarkoitukseen eli laakerin voiteluun, sillä se ei välttämättä levity laakeriin normaalirasvan tavoin. Johtavan rasvan partikkelit aiheuttavat laakerin vierintäpinnalle normaalia rasvaa nopeamman mekaanisen kulumisen ja ikääntyessä johtavan rasvan johtamiskyky heikkenee. Esimerkiksi *Chomerics* tarjoaa partikkeleja sisältämätöntä johtavaa rasvaa *CHO-LUBE 4220*, jonka eliniäksi luvataan vain 12 kuukautta. [3, 31, 32]

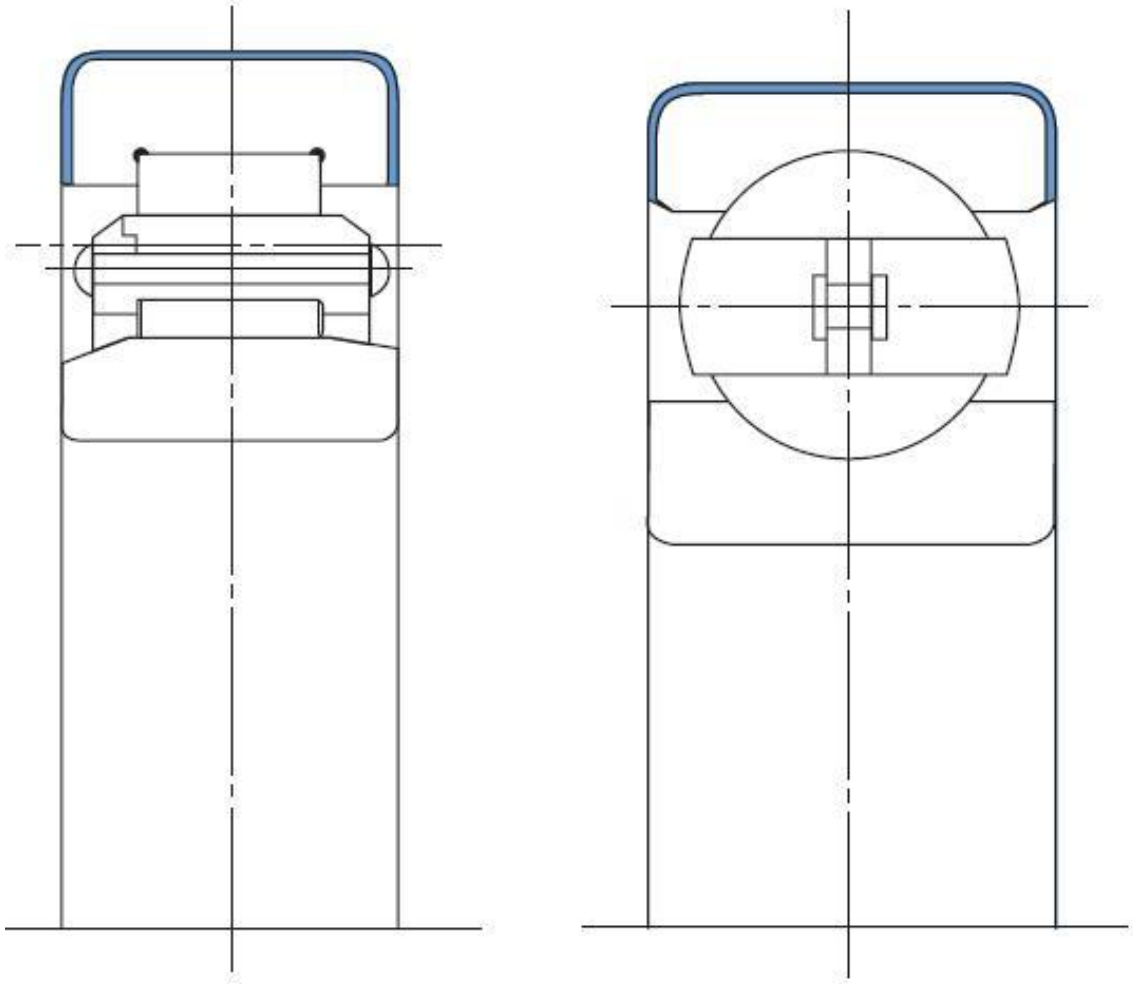
3.3.3 Laakerin eristys

Laakerin eristäminen koneen rungosta vaimentaa tehokkaasti laakerivirtojen kulkua. Matalataajuisten kiertovirtojen kulku voidaan ehkäistä kokonaan ja korkeataajuisiakin laakerivirtoja voidaan vähentää sallittavalle tasolle eristepaksuuksilla, jotka eivät heikennä mekaanista rakennetta merkittävästi. Jo toisen laakerin eristäminen riittää katkaisemaan kiertävän virtareitin laakerin lävitse. Jos akseli on maadoitettu, on toinenkin laakeri eristettävä, ettei uutta virtareittiä kiertovirroille pääse syntymään. Toisenkin laakerin eristäminen voi olla suotavaa korkeataajuisten ei-kiertävien laakerivirtojen ehkäisemiseksi. [4, 6]

Laakereiden eristäminen saattaa olla joissain sovelluksissa liian kallis ratkaisu eikä se silti takaa täyttä suojaa laakerille. Ajan myötä laakerieristeen eroosio voi heikentää sen eristyskykyä ja korkeataajuisille virroille voi muodostua reitti laakerin läpi. [3]

Laakerin pinnoitus

Plasmasuihkutusta käytettäessä laakerin eristykseen, laakerin ulko- tai sisäradan ulkopinta päällystetään eristävällä aineella. Eristeenä voi toimia alumiinioksidikerros tai ohutta alumiinikerrosta voidaan käyttää keraamisen eristekerroksen tarttumisen takaamiseksi. Keraamisen kerroksen paksuus vaihtelee yleensä välillä 0.05 – 0.5 mm, mutta laakerin ulkomitat pysyvät silti standardimitoissa. Japanissa keraamikerroksen standardipaksuudeksi on asetettu 0.5 mm korkeataajuisten laakerivirtojen ehkäisemiseksi. Plasmasuihkutuksella tehty eristys vastaa kymmenien megaohmien DC-resistanssia. DC-resistanssin suuruudella ei tosin ole käytännön merkitystä puhuttaessa korkeataajuisten laakerivirtojen ehkäisystä. Matalataajuisia, niin sanottuja klassisia kiertovirtoja suihkutettu eristyskerros kuitenkin ehkäisee tehokkaasti. Kuvassa 14 on esitetty pallo- ja rullalaakerit plasmasuihkutuksella eristettyinä. Lähde [6] suosittelee, että yli 350 mm akselikorkeuden omaavien sähkökoneiden laakerieristyksen impedanssin tulisi yltää 100 ohmiin 1 MHz:n taajuudella. [24, 30, 27, 33, 34]



Kuva 14. Rulla- ja pallolaakereiden eristyskerros esitetty kuvassa sinisellä pinnalla [33]

Keraamisella kerroksella päällystettyjen laakereiden pinnoitteen huokoset keräävät valitettavasti kosteutta ja laakerin eristyskyky heikkenee. Keraamisesti pinnoitetut laakerit tulisikin päällystää hartsilla, jottei laakeripäällysteen huokosiin pääse kerääntymään kosteutta. [33]

Eristävä pinnoite on hyvin ohut eikä sen uskota vaikuttavan lämmön siirtymiseen pois laakerista. Hyvin ohut eristyskerros aiheuttaa kuitenkin epäilyjä sen riittävyydestä laakerivirtojen ehkäisyyn [3], koska virrat kulkevat kapasitiivisesti ohuen eristekerroksen yli. On olemassa kokemusperäistä tietoa, että alle 2 vuotta pyörineissä, eristävällä pinnoitteella päällystetyissä laakereissa, on ollut merkkejä laakerivirroista.

Laminaattieristys

Kappaleessa 3.3.1 on jo tarkasteltu pesäeristyksen toteutusta kustannusten kannalta. Laakerivirtaeristystä ei tarvitse välttämättä tehdä pesäeristyksenä, vaan eristys voidaan asentaa päätykilpeen tai akselin ja laakerin välille sovelluksesta riippuen. Tärkeintä on, että eristys katkaisee laakerivirran reitin.

Eristysaineena voidaan käyttää esimerkiksi *Vetronit G11* tai *Isoval G11* laminaattia. Näille eristeille on ominaista hyvä sähköinen eristys, mutta valitettavasti myös hyvä lämmön eristys, kuten on tavallista sähköisten eristeiden tapauksessa. Laakerit ovat nopeasti pyörivissä sähkökoneissa alttiina kuumenemiselle, eikä lämmönsiirtoa laakereilta ympäristöön tule heikentää merkittävästi. Tämän vuoksi laakerin eristysmateriaalin paksuus on optimoitava kahden tärkeän seikan välille.

Laminaattieristyksen on todettu olevan toimiva ratkaisu laakerivirtojen ehkäisyyn. Sen asentaminenkaan ei ole valmistuksen kannalta hankalaa. Kappaleen 4.2 mittauksissa kestomagneettitahtikoneessa käytettiin 2 mm laminaattieristystä ja mittaustulosten perusteella sen voitiin todeta eristävän korkeataajuisia kiertovirtoja suunnitellusti.

3.3.4 Akselin maadoitus

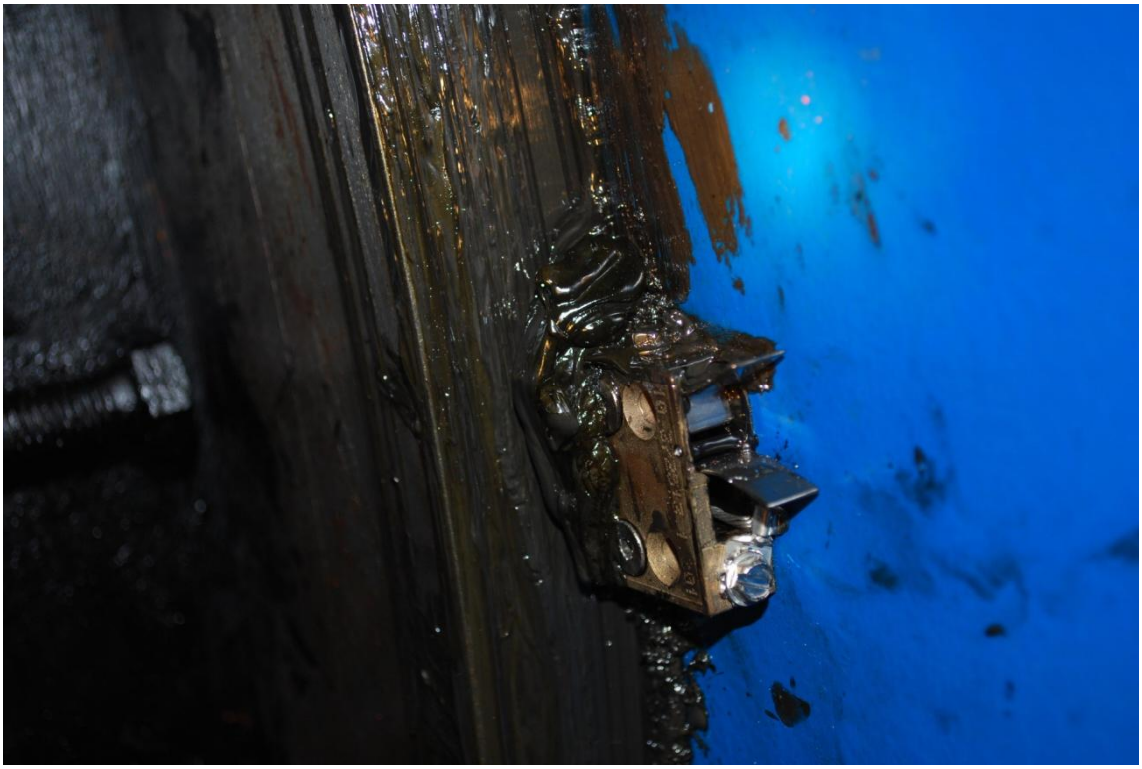
Sähkökoneen akseli maadoitetaan usein akselijännitteen pienentämiseksi. Korkea akselijännite voi vaarantaa sähkökoneen laakereiden ohella sähkökäyttöketjun muitakin osia. Hyvä maadoitus takaa akselivirralle laakereiden läpi kulkevaa virtatietä matalaimpedanssisemman reitin. Korkeataajuisen akselijännitteen matalaimpedanssiseen maadoitukseen oman haasteensa tuo akselin pyörivä liike. Yksi suurimmista ongelmista erilaisissa maadoitustoteutuksissa on sen mekaaninen kuluminen. Seuraavissa kappaleissa on esitelty muutamia ratkaisuja akselin maadoittamiseen.

Akselin maadoitus hiiliharjalla

Hiiliharjat maadoittavat akselin tehokkaasti, kunhan ne ovat oikein asennettuja ja toimintakuntoisia. Hiiliharjojen kokonaisvastus virralle akselikontaktista runkoon jää paljon laakerivastusta pienemmäksi.

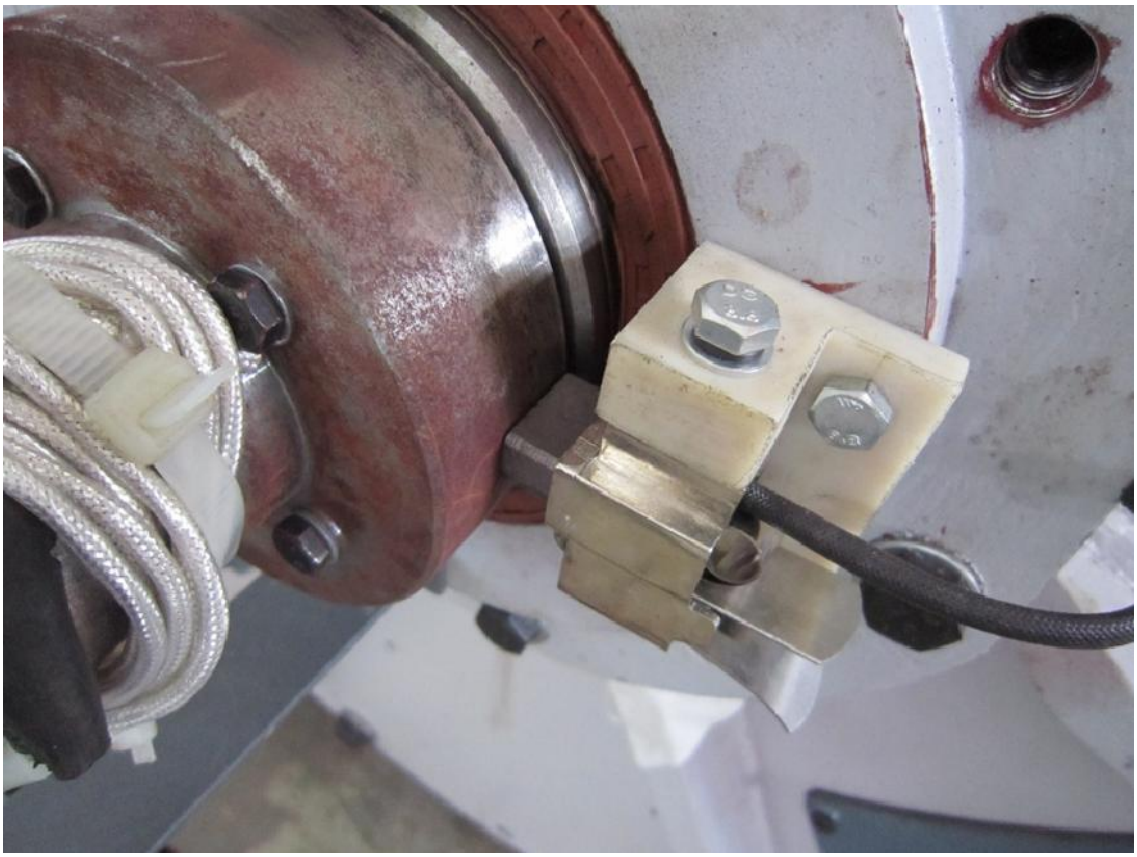
Tässä työssä toteutettiin *MGR10* mikro-ohmimittarilla hiiliharjavastuksen mittaus 8 A tasavirralla. Akselin päähän kiinnitettiin pultti, johon mittarin toinen pää kiinnitettiin. Akselille asennettiin tuulivoimageneraattoreissa yleisesti käytettävä hiiliharja, joka yhdistettiin 2.5 metrisellä 6 mm^2 kuparipunosköydellä mikro-ohmimittarin toiseen mittapäähän. Vastusarvoksi saatiin tällöin 45 mΩ. Laakerivastuksen resistanssiksi arvioidaan tyypillisesti 5 – 20 Ω [4].

Hiiliharjojen kontaktipinnan impedanssi voi kasvaa käytössä. Ilmankosteus saattaa kerätä hiiliharjojen pinnalle vesikerroksen ja laakerista voi valua voiteluainetta tai sen yhdisteitä akselille, joka heikentää hiiliharjojen kontaktia akseliin [3, 26, 35]. Akselin pyöriessä hiiliharjoista irtoaa myös hiilipölyä, joka akselille kasaantuneisiin epäpuhtauksiin sekoittuessaan voi aihettaa vakaviakin maadoitusongelmia, kuten kuvasta 15 hyvin käy ilmi. Joissakin sovelluksissa hiilipölyn vuoksi joudutaan käyttämään erillisiä hiilipölypuhaltimia.



Kuva 15. Hiiliharjaan on kerääntynyt voiteluaineen ja hiilipölyn sekoitusta

Myös akselin pinnan ruostuminen aiheuttaa omat haasteensa akselin maadoitukseen varsinkin merituulivoimaloiden suolaisissa ympäristöissä. Kuvassa 16 on esitetty ruostunut akselin pinta, joka heikentää maadoituksen toimivuutta. Yleensä hiiliharjan hankaus ehkäisee ruosteen syntymistä.



Kuva 16. Akselin maadoitus hiiliharjalla ruostekerroksen läpi

Yksi suurimmista ongelmista hiiliharjojen käytössä on niiden nopea kuluminen. Vaikka kestomagneettitahtikoneilla päästään eroon roottorin magnetoinnista hiiliharjojen avulla, käytetään niitä kuitenkin akselin maadoittamiseen. Kulumiseen vaikuttaa koneen pyörimisnopeus eli hiiliharjan akselilla kulkema matka, mutta myös hiiliharjan läpi kulkema virta, joka aiheuttaa kovaa kuumenemista ja ylimääräistä kulumista [3, 35]. Jos sähkökoneen akseli maadoitetaan useammalla rinnakkaisella hiiliharjalla impedanssin pienentämiseksi entisestään, on tärkeää käyttää tasapitkiä maadoitusjohtimia, jotta maadoitusvirta ja hiiliharjojen kuluminen jakaantuu tasaisesti hiiliharjojen välille.

Kun hiiliharjoja joudutaan vaihtaamaan esimerkiksi kahden vuoden välein, kerääntyy tästä generaattorin eliniän aikana melkoisesti huolto- ja ylläpitokustannuksia. Nykyisin turhaa tai varmentavaa vaihtotyötä pyritään vähentämään lisäämällä hiiliharjoihin kulumisen ilmaisun indikaattoreita.

Hiiliharjojen lisäksi markkinoilla on tarjolla maadoitusharjoja. Tämän tyyppiset harjat ovat hiiliharjoja kalliimpia, mutta niiden kuluminen ei aiheuta hiilipölyä kuten hiiliharjoilla. Kuvassa 17 on esitetty eräs *Sohre Turbomachineryn* maadoitusharjaratkaisuista.

Kuva 17. Maadoitusharja [36]

Akselin maadoitus maadoitusrenkaalla

Eräs varsin varteenotettava ja lupaava vaihtoehto hiiliharjoille akselin maadoitukseen on maadoitusrengas. Maadoitusrenkaan maadoitusteho ei riipu roottorin pyörimisnopeudesta. Maadoitusrengas asennetaan sähkökoneen akselin päähän, josta

akselijännite purkautuu matalaimpedanssisen maadoitusrenkaan kiinnityspulttien tai johtavan liimaseoksen kautta sähkökoneen runkoon. Tällä hetkellä maadoitusrengasta saa tuulivoimakäyttöihin ainakin kahdelta valmistajalta hieman erilaisilla ratkaisuilla. Toinen valmistaja täyttää maadoitusrenkaan koko sisäpinnan mikrohiilikuiduilla ja toinen luottaa useisiin ”mikrohiilikuitutupsuihin”. Maadoitusrenkaiden maadoitustehoa on vertailtu mittausten avulla hiiliharjoihin kappaleessa *Akselin maadoitusratkaisujen vertailu 1735 rpm, 2935 kW sähkökoneella*. [3, 35]

Maadoitusrenkaille ominaista on hyvin alhainen hankauskitka ja merkityksetön kuluminen. Hiiliharjojen tuottamaa hiilipölyä ei akselin ympäristöön myöskään synny. Mikrokuitujen luvataan leikkaavan likaa, rasvaa ja pölyä. Lisäksi mikrokuitujen ionisaatiosta johtuvat koronapurkaukset kykenevät luomaan virralle reitin myös pienen ilma- tai kosteuskerroksen läpi. Lähteessä [35] tehtyjen 8700 tunnin (lähes yksi vuosi) kokeiden aikana ei maadoitusrenkaan suorituskyvyssä havaittu muutoksia. Tämän lisäksi on tiedossa eräs käyttö, jossa maadoitusrengas on toiminut kuusi vuotta ilman häiriöiden ilmaantumista. [3, 35]

Vaikka maadoitusrenkaat tarjoavat monia etuja hiiliharjoihin verrattuna, on niillä muutama heikkous korkeamman hinnan lisäksi. Toisin kuin hiiliharjat, maadoitusrenkaan mikrokuidut eivät estä ruosteen muodostumista hankauskitkan ollessa olematon. Tämän vuoksi niiden käyttö ei välttämättä ole perusteltua suolaisen meriveden läheisyydessä. Lisäksi rasvan ja lian sekainen koostumus voi joissain käytöissä kuivua harjaksien väliin ja estää mekaanisesti mikrokuitujen ja akselin välisen kontaktin.

3.3.5 Koneen rungon maadoitus

Moottorin rungon maadoitus tulee tehdä huolellisesti ja maadoitukseen tulee käyttää matalaimpedanssisia johtimia ja kiinnikkeitä. Moottorin rungon ja maadoituskiinnityksen välinen impedanssi saisi olla alle 1 ohmin 1 MHz:n taajuudella. Moottorikaapeleissa tulisi käyttää johtimia, joissa on kupari- tai alumiiniarmeerattu ”säteilysuoja”. Kunnollinen moottorikaapelin armeeraus ja suojamaa PE-kiskoon liitettynä luo moottorin rungon ja konvertterin rungon väliseen syöttökaapeliin eräänlaisen Faradayn häkin. Näin toteutettu maadoitus mahdollistaa moottorin rungon

potentiaalin purkautumisen hallitusti ja ehkäisee moottorikaapeliin indusoituvia radiotaajuisia häiriöitä. [1, 6]

3.3.6 Elektrostaattinen suoja

Sähkökoneeseen voidaan asentaa elektrosaattinen suoja, joka estää yhteismuotoisen jännitteen kapasitiivisen kytkeytymisen. Parhaaseen tulokseen päästään, kun suojataan sähkökoneen ilmaväli, staattoriurat ja kääminpäät. Elektrosaattinen suoja ei ole välttämättä käytännöllinen menetelmä hankalan asennuksen, korkean hinnan ja sen aiheuttamien ylimääräisten häviöiden vuoksi. Elektrosaattisella suojalla on kuitenkin saavutettu hyviä tuloksia laakerivirtojen ehkäisyssä. [2]

Elektrostaattisella suojalla on tärkeää suojata kaikki mahdolliset kapasitiiviset kytkeytymisreitit. Jos esimerkiksi staattoriurat jätetään suojauksen ulkopuolelle, pääsee yhteismuotoinen virta vuotamaan läpi staattorin uraeristyksen ja voi näin aiheuttaa laakerivirtaongelmia.

Lähteessä [37] on esitelty tekniikka staattoriurien eristämiseksi johtavalla materiaalilla staattoriselästä. Kaikki johtavat pinnat tulee luonnollisesti eristää toisistaan. Urien johtava suojaus kannattaa jakaa aksiaalisuuntaisiin kaistaleisiin, jotta perustaajuiset häviöt johtavassa eristeessä saadaan minimoitua. Kaistaleisiin jako jättää johtavaan eristeeseen aukkoja. Näiden aukkojen leveys on optimoitava, etteivät vuotovirrat lisäänny merkittävästi ja ratkaisun tehokkuus kärsi. [37]

Kaikkien urien johtavat suikaleet yhdistetään toisiinsa ja maadoitetaan sähkökoneen PE-pisteeseen. Jos urasuojausta jatketaan myös käämin ja roottorin väliin, vähentyvät ilmavälin kautta kytkeytyvät kapasitiiviset yhteismuotoiset virrat. Tällainen toteutus muodostaa ilmaväliin Faradayn häkkimäisen suojan. [37]

Urasuojan geometriset mitat ja käytettävä johtava aine vaikuttavat sen tehokkuuteen laakerivirtojen vähentämisessä. Suojan tulisi olla epämagneettista, mutta sähköä hyvin johtavaa [16]. Tehokkuutta ei voida kuitenkaan maksimoida käyttämällä täysin käämit ympäröivää, hyvin johtavaa ja paksua suojaa, sillä koneen suorituskyky kärsisi aiheutuvista häviöistä. Suojuksen rakenne täytyy optimoida koneen suoristuskyvyn ja laakerivirtojen vähentämisen välille. [37]

4 MITTAUKSET JA ANALYSOINTI

Seuraavassa on esitetty käytännön mittaustulokset ja niiden analysointi. Mittauksissa käytetyt mittalaitteet on esitelty tarkemmin liitteessä 2.

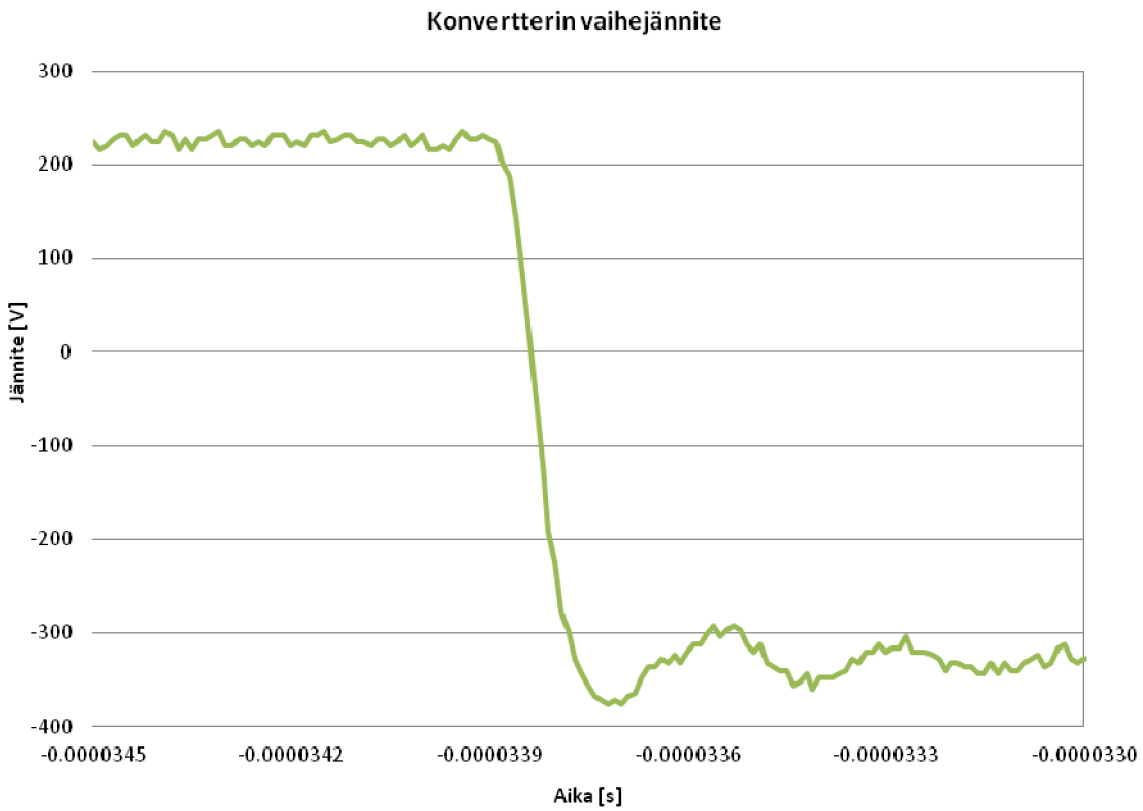
4.1 Käämeistä purkautuva yhteismuotoinen virta

Yhteismuotoisen jännitteen nopeat muutokset aiheuttavat vuotovirran pääosin suuren sähkökoneen suurimman hajakapasitanssin, käämi-runko-kapasitanssin C_{kr} kautta. Näin muodostuneelle virralle pätee kappaleessa 2.2 esitetty yhtälö (5). Tämä muodostunut korkeataajuinen virta pyritään ohjaamaan matalaimpedanssisen maadoituksen kautta pois moottorin rungosta. Maadoituksen epäonnistuessa, voi yhteismuotoinen virta kulkea koneen rakenteissa ja esimerkiksi laakereiden läpi.

Yhtälön (5) kapasitanssi voidaan laskea yhtälön (4) mukaisesti. Koneessa kulkevaa yhteismuotoista virtaa estimoitaessa kannattaa jännitteen muutosnopeudelle dU/dt käyttää korkeinta mahdollista arvoa, jonka sähkökäytön konvertteri pystyy koneen käämeihin tuottamaan. Kuvassa 18 on esitetty erään konvertterin pulssinleveysmoduloidun vaihejännitteen nousureuna kytkentätaajuuden ollessa 3 kHz. Jännitteen muutosnopeudeksi voidaan laskea todella korkea

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = \frac{(161-(-311))\ \mathrm{V}}{(33.865-33.775)\ \mu\mathrm{s}} = \frac{472\ \mathrm{V}}{90\ \mathrm{ns}} = 5.24\ \mathrm{kV/\mu s}, \tag{8}$$

jossa jännitteen muutos dU on 10 %:n ja 90 %:n väli jännitteen muutoksesta. dt on ajan muutos jännitteen muutoksen aikana ja aika-arvot ovat jännitearvoja vastaavat 10 %:n ja 90 %:n pisteiden ajankohdat.

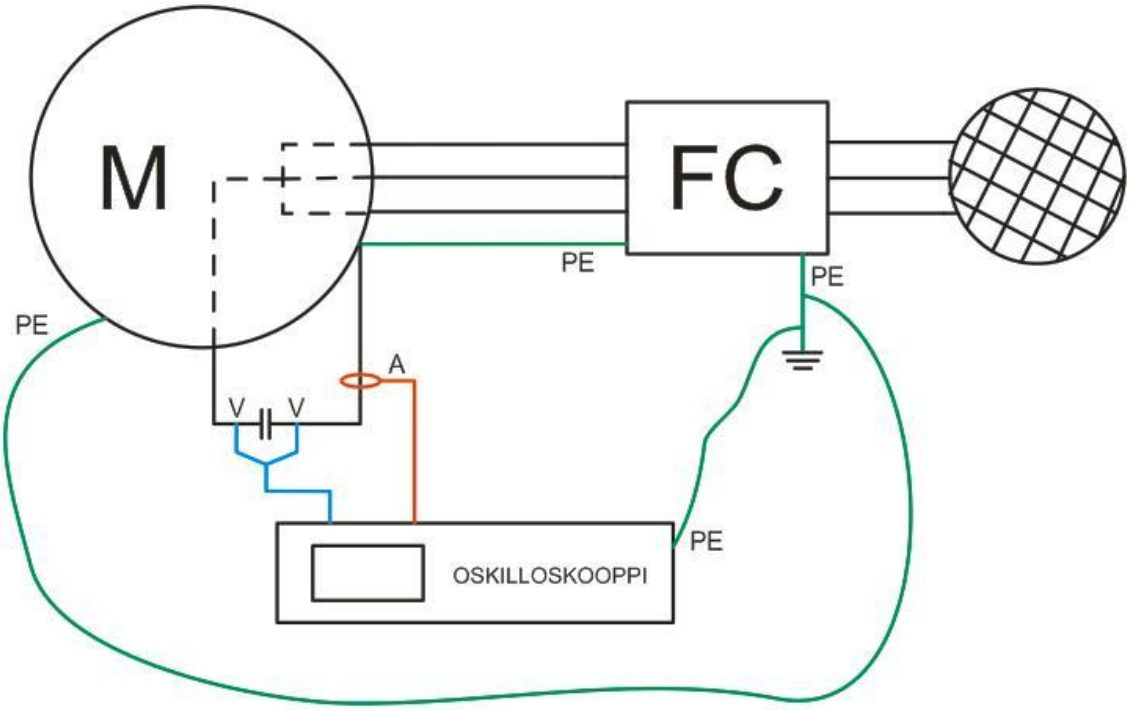


Kuva 18. Sähkökoneen vaiheesta mitattu 400 V:n jännitevälipiirikonvertterin tuottama jännitteen muutos

IGB-transistorit kykenevät nykyään jopa 50 ns virran nousuaikoihin [1, 3]. Jännitteen muutosnopeus riippuu monesta tekijästä, kuten käytettävästä taajuusmuuttajasta ja siirtojohdoista. Käytännössä jännitteen nousua konvertterin lähdössä kuitenkin rajoitetaan esimerkiksi suodattimia käyttämällä.

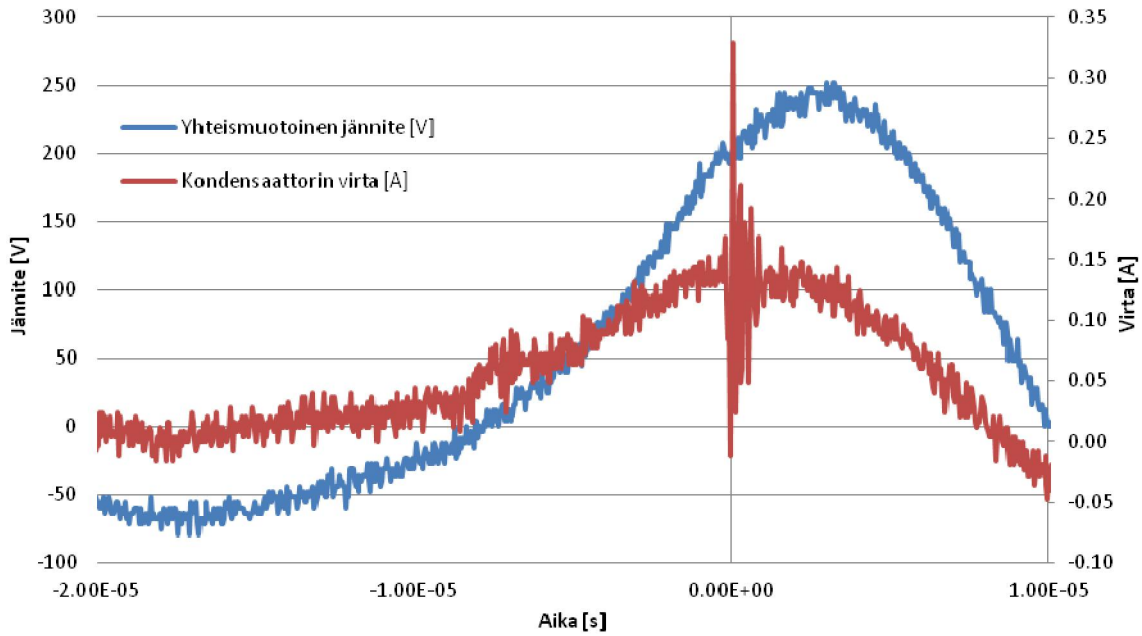
4.1.1 Levykondensaattorin kapasitanssin mittaukset

Käämeistä sähkökoneen runkoon purkautuvan yhteismuotoisen virran kytkeytymismekanismi on siis tunnettu. Tässä työssä toteutettiin mittausjärjestely, jolla käytäntöä ja teoriaa pyrittiin vertaamaan. Mittauksiin käytetty kytkentä on esitetty kuvassa 19 ja kuva käytännön mittausolosuhteista löytyy liitteestä 1.



Kuva 19. Levykondensaattorin avulla tehty mittausjärjestely. FC on lyhenne taajuusmuuttajasta, M moottorista, V jännitteenmittauspisteestä ja A virranmittauspisteestä

Oikosulkumoottoria syötettiin taajuusmuuttajalla, jonka kytkentätaajuus oli 3 kHz. Moottorin käämityksen tähtipiste yhdistettiin levykondensaattoriin. Kondensaattorin toinen puoli oli kytketty sähkökoneen ja konvertterin yhteiseen maahan koneen runkoon. Kone ja konvertteri on kytketty PE-johtimilla maahan sekä toisiinsa. PE:n ja tähtipisteen välinen yhteismuotoinen jännite muodostuu näin kondensaattorin yli. Kondensaattorin mitattiin olevan kapasitanssiltaan normaalin sähkökoneen käämi-runko-kapasitanssin C_{kr} suuruusluokassa [4]. Fluke 289 yleismittarilla mitatuksi arvoksi saatiin 6.3 nF. Kuvassa 20 on esitetty kondensaattorin yli vaikuttava yhteismuotoinen jännite ja kondensaattorin läpi vuotava virta nopean jännitemuutoksen seurauksena. Oskilloskooppia, passiivista jännitteen mittapäätä ja PEM-virtalenkkiä käytettiin levykapasitanssin yli vaikuttavan yhteismuotoisen jännitteen ja kondensaattorin läpi kulkevan yhteismuotoisen virran mittaukseen.



Kuva 20. Yhteismuotoisen jännitteen aikaansaama virta levykondensaattorin läpi.

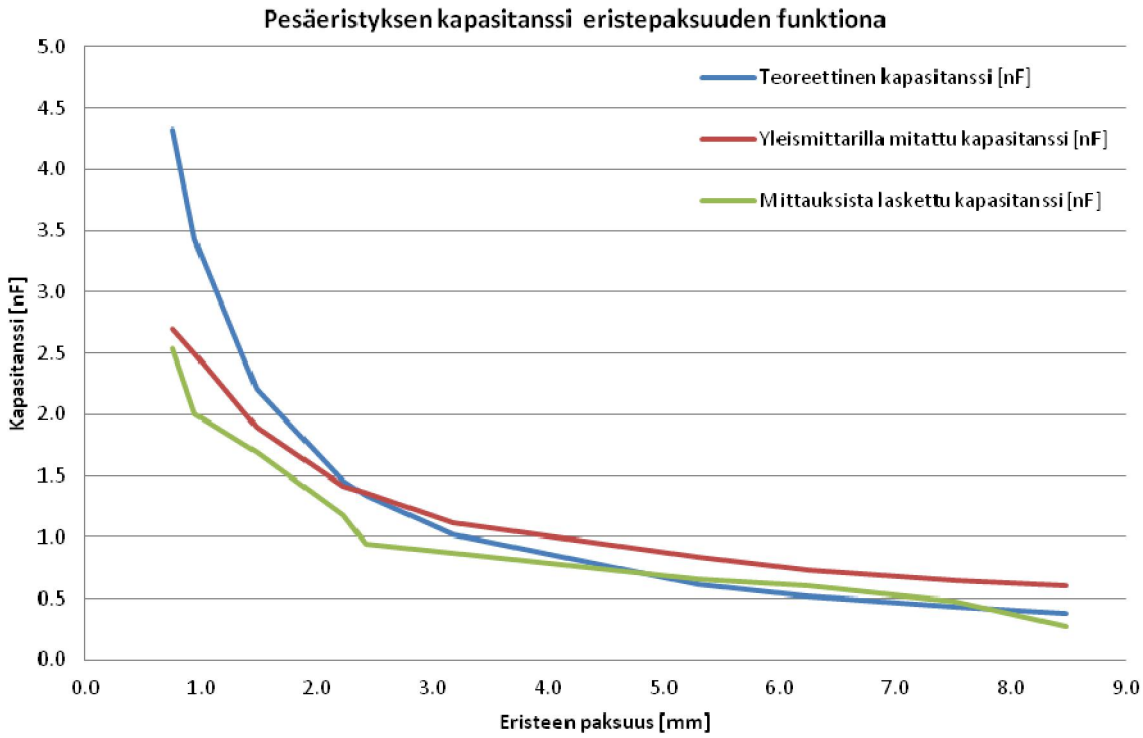
Mittaustuloksista laskettuna kondensaattorin arvo on

$$C = {I_{\mathrm{CM}}}\Big/{\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t}} = {0.14\ \mathrm{A}}\Big/{22\ \mathrm{V/\mu s}} = 6.34\ \mathrm{nF}, \tag{9}$$

joka vastaa hyvin yleismittarilla mitattua arvoa. Kuvan 20 virrassa näkyvä piikki ajanhetkellä 0 s johtuu konvertterin syöttämästä pulssinleveysmoduloidusta vaihejännitteestä. Tämänkin virtapiikin amplitudi voidaan ratkaista yhtälöllä (9), kun koneen hajakapasitanssit ja vaihejännitteen muutosnopeus dU/dt on tunnettu.

Laakerin pesäeristeenä yleisesti käytettävälle Vetronit G11 laminaatille tehtiin kattavat vuotovirtamittaukset. Eristepaksuudet pääty- ja takakilven välissä vaihtelivat mittauksissa 0.8 – 8.5 mm välillä. Mittausjärjestely oli sama kuin levykapasitanssin mittauksissa (kuva 19). Mitatuista yhteismuotoisen jännitteen ja -virran arvoista laskettiin kuvan 21 kapasitanssin arvot. Ennen mittauksia mitattiin levykondensaattorin kapasitanssi yleismittarilla sekä laskettiin pesäeristyksen kapasitanssille teoreettinen

arvo yhtälöllä (4). Liitteessä 3 on taulukoitu kapasitanssien laskemiseen käytettyjä virran, jännitteen ja ajan arvoja sekä kuva mittausolosuhteista.

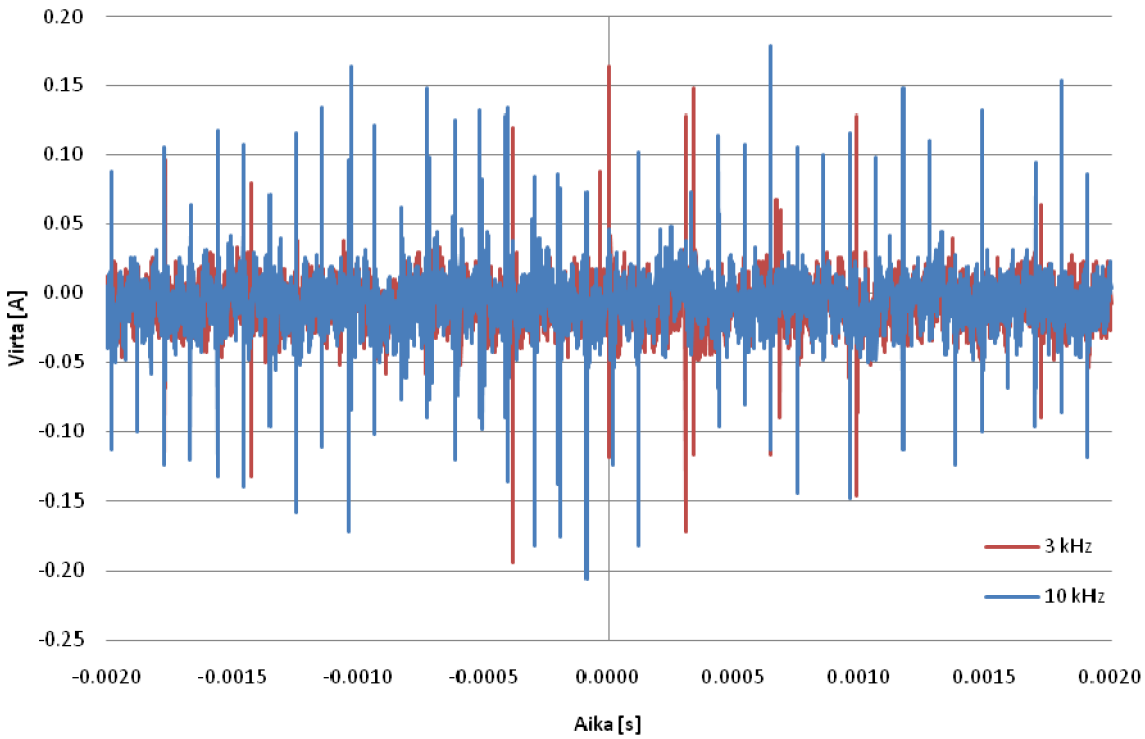


Kuva 21. Erään laakerieristeen paksuuden vaikutus kapasitanssiin

Kuten kuvasta 21 ja liitteestä 3 näkyy, päästään kolmella eri menetelmällä varsin samoihin kapasitanssin arvoihin, vaikka kapasitanssin arvot ovat vain muutamia nanofaradeja. Aivan ohuimmilla eristeen paksuuksilla kapasitanssin mittaustulokset ja teoreettinen arvo eivät vastaa täysin toisiaan. Eriste puristettiin tiukasti pääty- ja takakilven väliin, joten eristeen paksuuden tulisi vastata pääty- ja takakilven todellista väliä. Teoreettisen kapasitanssin ero muilla menetelmillä mitattuihin kapasitansseihin ohuella eristepaksuudella on kuitenkin ”turvallisella puolella” ajatellen sähkökoneen vuotovirran estimointeja. Tuloksista voidaan päätellä, että tarvittavaa eristepaksuutta voidaan arvioida teoreettisesti, kun tunnetaan jännitteen muutosnopeuden ja virran arvo.

4.1.2 Kytkentätaajuuden vaikutus yhteismuotoiseen virtaan

Kytkentätaajuuden nostaminen lisää eristeissä tapahtuvaa läpilyöntien määrää lineaarisesti. Tätä ilmiötä tutkittiin kappaleen 4.1.1 kokoonpanolla, jossa taajuusmuuttajan kytkentätaajuutta muunneltiin 3 – 10 kHz välillä. Kuten kuvasta 22 voidaan silmämääräisesti todeta, kytkentätaajuuden kasvattaminen lisää läpilyöntien määrää merkittävästi. Näin käy myös todellisen sähkökoneen hajakapasitansseissa. Korkeimmat virtapiikit kuvassa 22 johtuvat vaihejännitteen pulssimaisuudesta, jonka jännitteen nousu- ja laskuajat ovat 100 ns luokkaa. Virtapiikkien amplitudi on verrannollinen hajakapasitanssien suuruuteen; mitä pienempi kapasitanssi eli suurempi eristepaksuus, sitä matalampi virtapiikki. Eristepaksuuksia ei voida kuitenkaan kasvattaa liikaa, sillä esimerkiksi uraeristeen paksuuden lisääminen johtaisi koneen suorituskyvyn heikkenemiseen. [14]



Kuva 22. Kytkentätaajuuden nostamisen vaikutus läpilyönteihin

4.2 Kestomagneettitahtikoneelle tehdyt laakerivirta- ja akselijännitemittaukset

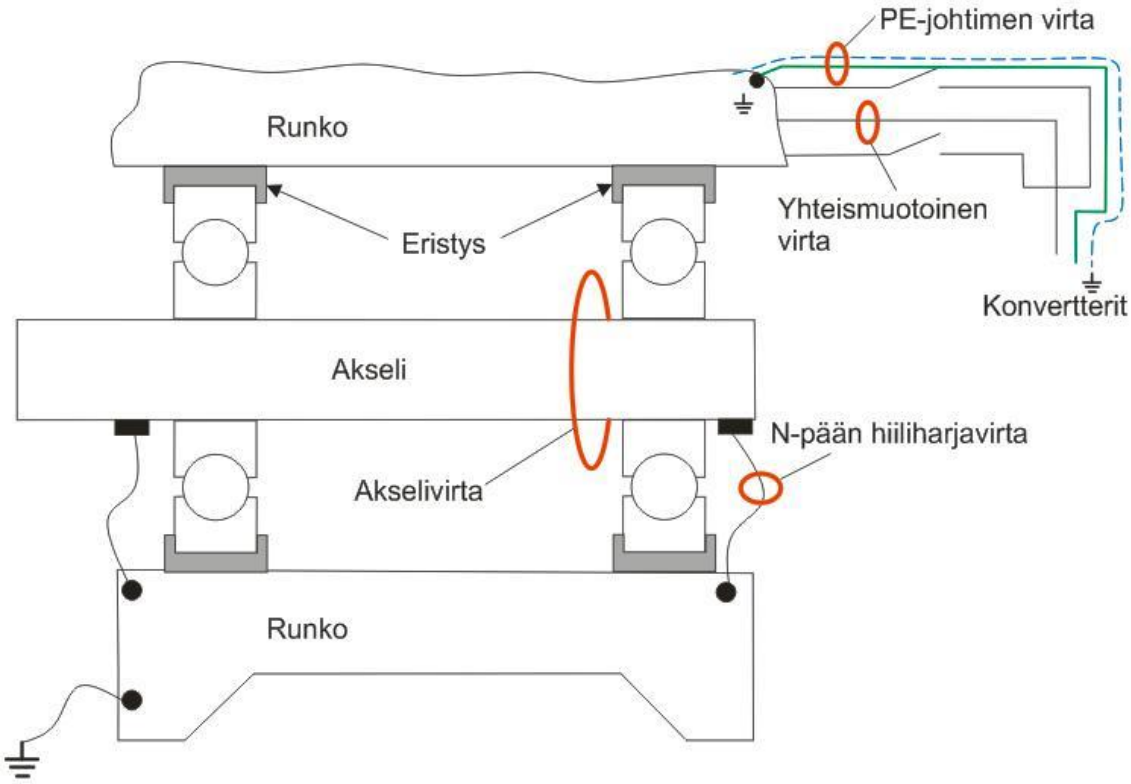
Laakerivirta- ja akselijännitemittausten tarkoituksena oli todeta suoravetoisessa 4.3 MW:n 15.6 rpm kestomagneettitahtikoneessa kulkevan kiertovirran olemassaolo, sen amplitudi ja taajuussisältö. Lisäksi mitattiin koneen käämeihin konvertterilta kulkeva yhteismuotoinen virta sekä koneen akselille indusoitunut akselijännite. Koneen akselin maadoitus on toteutettu molemmista akselin päistä kolmella 120 asteen välein jaetulla hiiliharjalla koneen runkoon. Koneen kummassakin laakerissa on käytetty 2 mm *GFRP* pesäeristystä. Mittauksissa käytettiin erikoisvalmisteisia korkeataajuisten virtojen mittauksiin tarkoitettuja Rogowski-virtalenkkejä. Akselijänniteen mittaukseen käytettiin passiivista jännitemittapäätä. Virta- ja jännitearvojen luenta ja tallennus suoritettiin oskilloskoopilla.

Tuulivoimageneraattoriksi valmistettua kestomagneettitahtikonetta ajettiin testeissä sekä moottorina että generaattorina. Tyhkäkäyntiajot ajettiin moottorina ja kuormitusajot generaattorina, jolloin generaattoria pyöritti toinen samanlainen kone. Kuormistusajossa koneet oli yhdistetty toisiinsa eristetyllä kytkimellä, etteivät akselit olleet sähköisessä kontaktissa toistensa kanssa.

Koneen staattorikäämi on jaettu kolmeen osaan, joita jokaista syöttää oma konvertterityksikkö. Konetta oli näin ollen mahdollista pyörittää myös yhden konvertteriyksikön syöttämänä, jolloin yhteismuotoisen virran mittaus yhden konvertteriyksikön syöttökaapeleista voitiin tehdä. Kolmella konvertteriyksiköllä ajettuna kaikkien syöttökaapeleiden yhteismuotoisen virran mittaus ei ollut mahdollista, johtuen kytkentäkoteloiden sijainnista koneen kehällä. Kunkin kolmen käämin jokaiseen vaiheeseen kytkettiin 3 kappaletta 240 mm^2 paksuisia syöttökaapeleita. Koneen syöttökaapelointi koostui 30 kaapelista PE-johtimet mukaan laskettuina. Kaapelien pituus oli noin 35 metriä, joten jännitteen heijastumista koneen terminaaleissa saattoi tapahtua. Kaapeleiden asennus konvertterilta koneeseen ei ollut symmetrinen, johtuen käytetystä kaapeloinnista. Kaapelit oli asennettu kaapelikiskoille, kuten kappaleen 4.2.8 kuvasta 42 voidaan nähdä.

Kuvassa 23 on esitetty yhteismuotoisen- ja kiertovirran mittausjärjestely. Neljäkanavaisella oskilloskoopilla oli mahdollista mitata samanaikaisesti neljää virtaa: akselivirtaa, hiiliharjavirtaa, PE-johtimen virta sekä yhteismuotoinen virta (yhden

kytkentäkotelon syöttökaapeleiden summavirta). Konvertterissa moottoripuolen kytkentätaajuus oli oletusarvoisesti 2.4 kHz ja verkkopuolen kytkentätaajuus 3.6 kHz. Käytetyt kytkentätaajuudet oli valittu konvertterien häviöiden ja säädön perusteella. Modulaattorityyppinä käytettiin SVM#2, josta lisää kappaleessa 4.2.6.



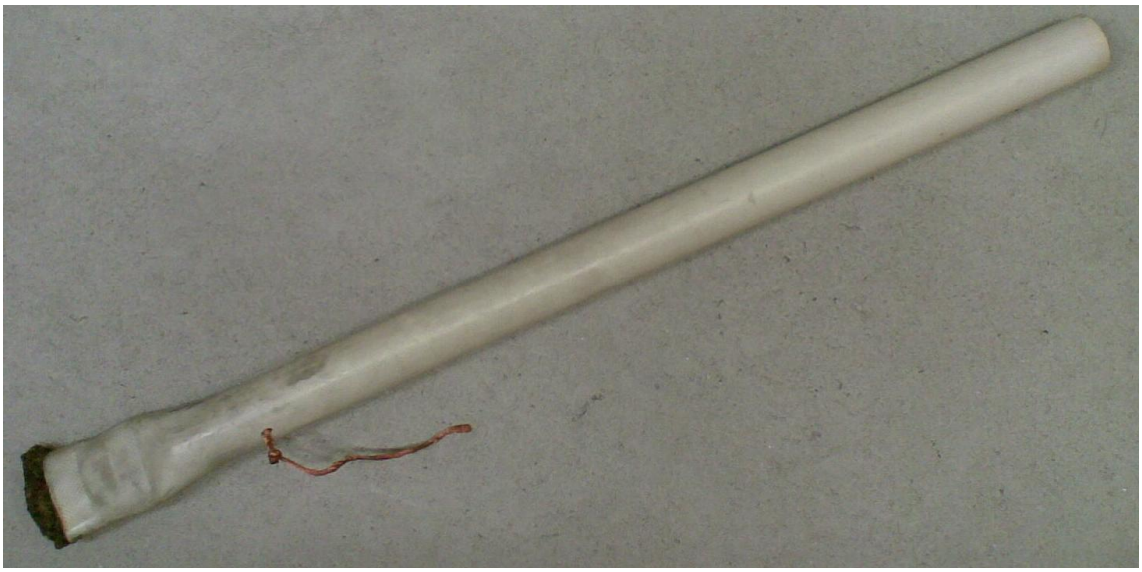
Kuva 23. Yhteismuotoisen- ja kiertovirran mittausjärjestely kestomagneettitahtikoneessa

4.2.1 Akselijännitteen mittaus

Akselijännitteen mittaus teollisuus- tai laboratorio-olosuhteissa voi olla hyvin haastavaa. Akselijännite mitataan usein pyörivästä akselista jonkinlaisella laahurilla. Jos laahurin säikeet muodostavat silmukan tai ovat liian pitkät, indusoituu niihin helposti häiriöitä, jotka voivat sekoittua todellisen akselijännitteen taajuuskomponentteihin. On huolehdittava siitä, että mittaussignaalin siirtoon käytettävät johtimet eivät ole tarpeettoman pitkiä tai muodosta silmukkaa, jotta ympäristöstä indusoituvat häiriöt jäävät mahdollisimman pieniksi. Suojattuja johtimia tulisi suosia. Ennen mittauksia on tunnettava, mitä taajuuskomponentteja akselijännitteestä etsitään. Tyypillisiä

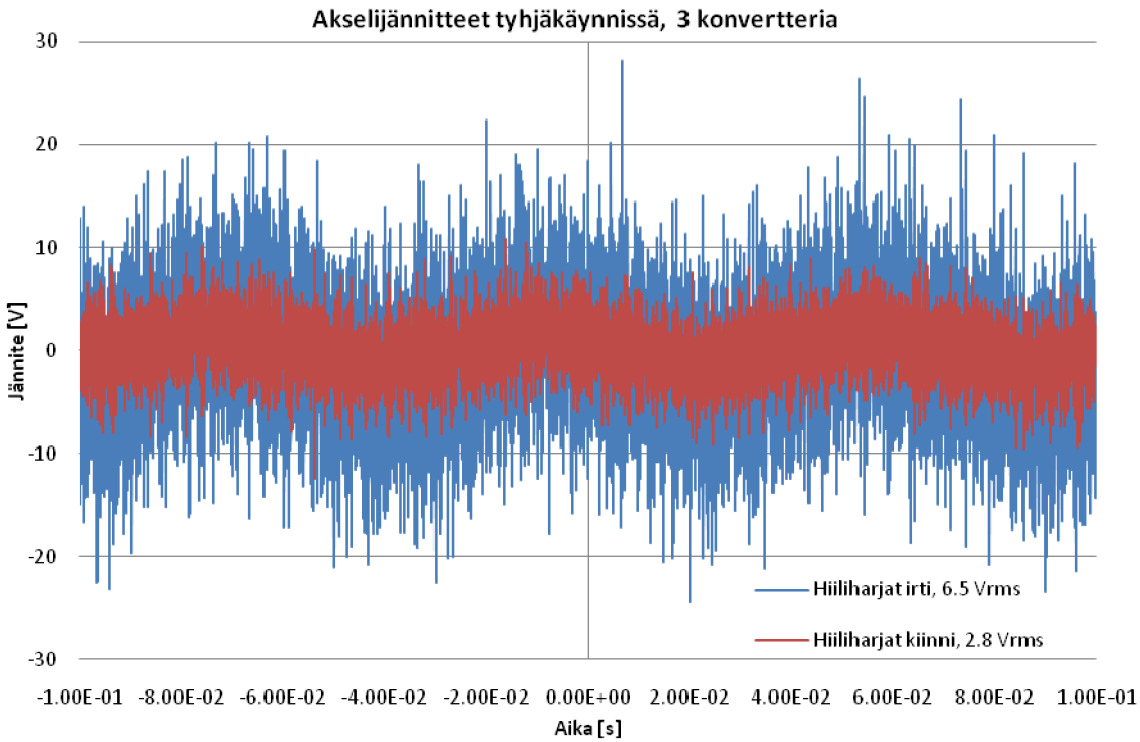
akselijännitteestä löytyviä taajuuskomponentteja ovat kytkentätaajuudet ja syöttötaajuus sekä näiden monikerrat.

Akselijännitteen mittauksissa kestomagneettitahtikonetta pyöritettiin tyhjäkäynnissä kolmella konvertteriyksiköllä 15.3 Hz taajuudella. Akselijännite mitattiin koneesta hiiliharjat irrotettuina ja kiinnitettyinä, jotta voitiin todeta hiiliharjojen maadoituskyky. Akselijännitteen mittaukseen käytettiin pitkää mittavartta, jolla pyörivää akselia voitiin turvallisesti laahata. Kuvassa 24 esitetty mittavarsi oli rakennettu sähköä johtamattomasta varresta ja lyhyistä kuparipunoskaistaleista. Jännitteen mittauspään toinen pää kiinnitettiin kuparipunosjohtimeen ja toinen pää ”hauenleukaa” käyttäen moottorin runkoon. Moottorin runko oli maadoitettu potentiaalintasauskiskoon.



Kuva 24. Akselijännitteen mittauksissa käytetty laahuri. Mittavarren pään kuparipunoskaistaleista lähtee kuparipunosjohdin jännitteen mittapään kiinnitystä varten.

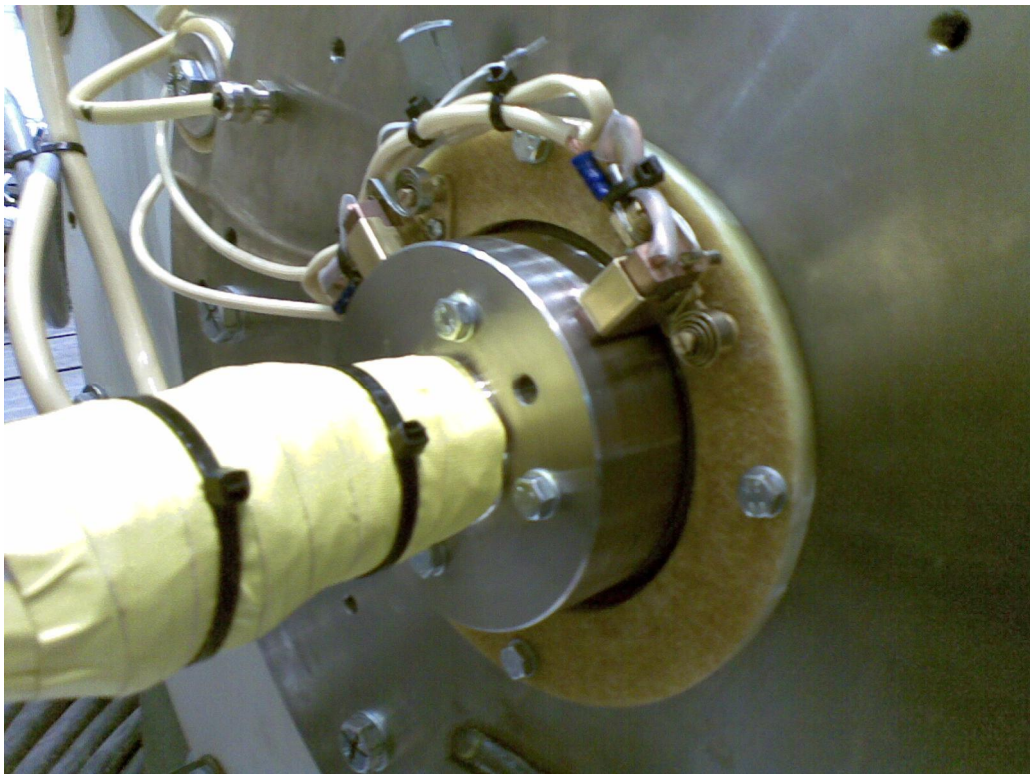
Hiiliharjat kiinnitettyinä akselijännitteeksi mitattiin 2.8 V_{RMS} ja hiiliharjat irrotettuina 6.5 V_{RMS}. Kuvassa 25 on esitetty akselilta mitatut jännitteet, joista erottuu selkeä matalataajuinen jännitekomponentti. Akselijännitteen aaltomuodosta on nähtävissä myös korkeataajuisten komponenttien voimakkuus. Akselijännitteen matalataajuisesta komponentista on kerrottu lisää kappaleessa 4.2.4.



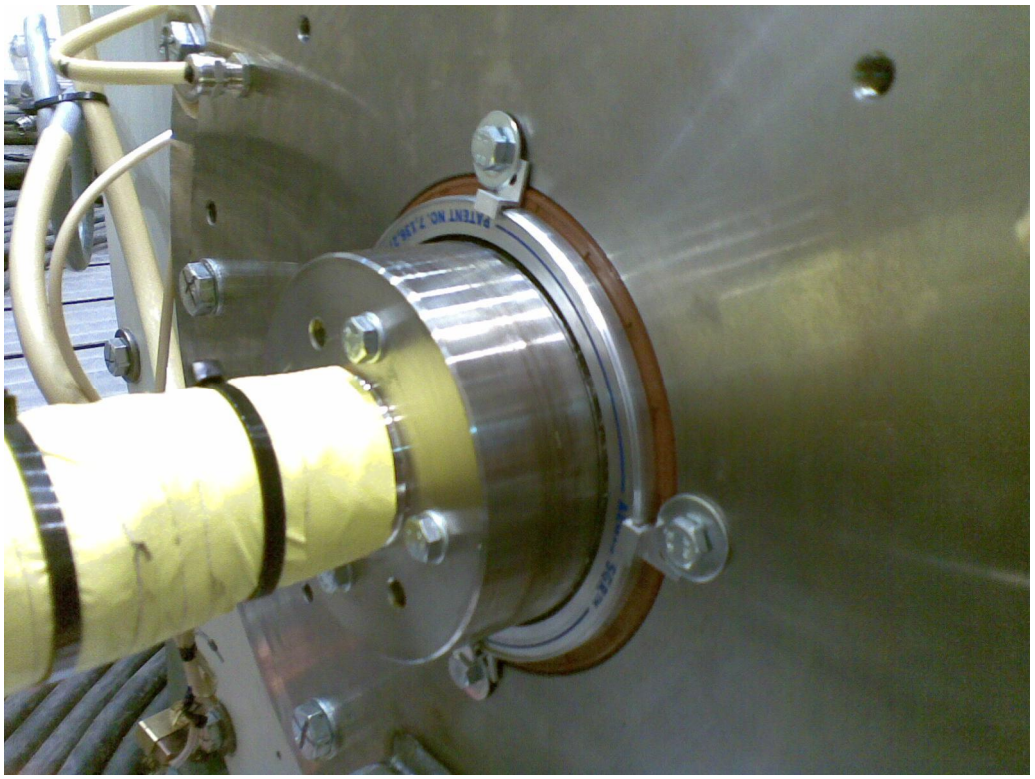
Kuva 25. Akselijännite hiiliharjat irrotettuina ja kiinnitettyinä

Akselin maadoitusratkaisujen vertailu 1735 rpm, 2935 kW sähkökoneella

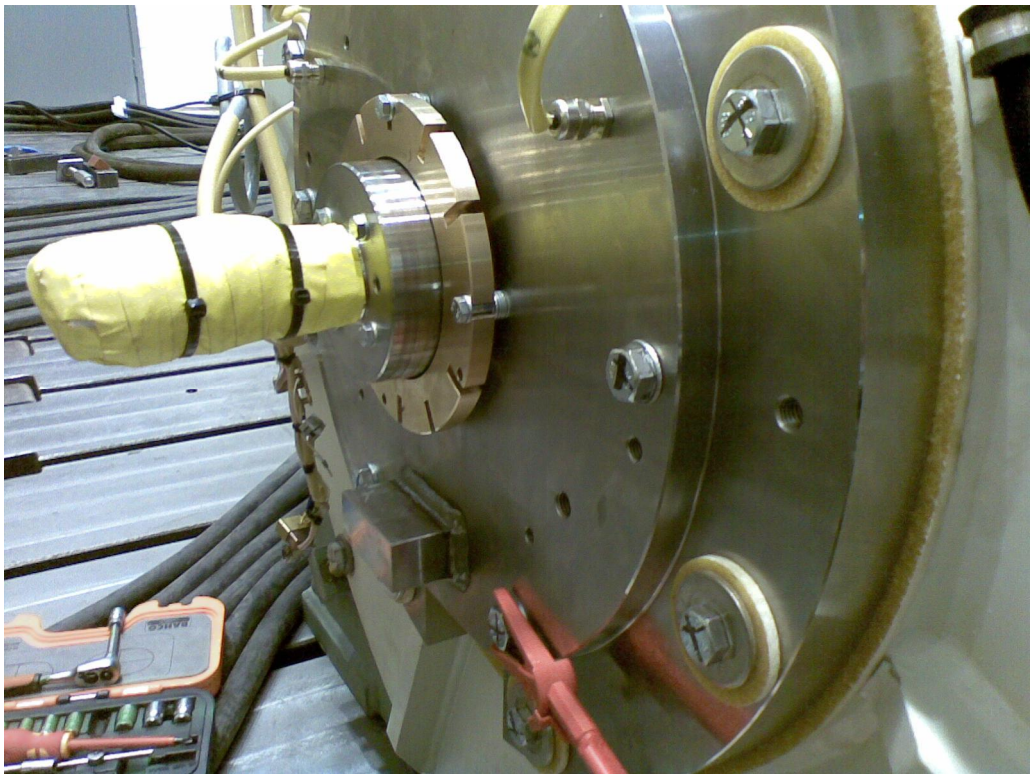
Akselin maadoitusratkaisujen vertailemiseksi hankittiin kahdelta eri valmistajalta maadoitusrenkaat ja yhdeltä hiiliharjavalmistajalta hiiliharjaratkaisu. Mittaukset toteutettiin samalla tavalla kuin edellisessä kappaleessa. Mittauksissa käytetyn kestomagneettitahtikoneen nimellistaajuus oli 86.75 Hz. Konetta pyöritettiin moottorina tyhjäkäynnissä nimellisnopeudella sekä nopeusohjeella 0 Hz. Mittaustulokset on koottu taulukkoon 1. Kuvassa 26 akseli on maadoitettu hiiliharjoilla, kuvassa 27 *Aegis*-maadoitusrenkaalla ja kuvassa 28 *Inpro*-maadoitusrenkaalla. Koska mittauksissa käytetyn sähkökoneen laakerit olivat pesäeristetyt ja akselin maadoitusratkaisut oli kiinnitettävä galvaanisesti eristettyyn laakeripesään, oli laakeripesä maadoitettava testien ajaksi pesäeristyksen oikosulkevalla johtimella moottorin runkoon.



Kuva 26. Akselin maadoitus hiiliharjoilla



Kuva 27. Akselin maadoitus Aegis-maadoitusrenkaalla



Kuva 28. Akselin maadoitus Inpro-maadoitusrenkaalla

Taulukko 1. Akselin maadoitusratkaisujen vertailua

Maadoitustapa	Nopeus [rpm]	Jännite [Vrms]	Jännite [Vpiikki]	Hinta [€]
Aegis	0	0.1	3.5	500
	1735	0.2	6.1	
Inpro	0	0.2	2.8	200
	1735	0.7	6.1	
Hiiliharjat	0	0.1	2.3	100
	1735	0.1	3.1	
Ei maadoitusta	0	9.1	48.4	0
	1735	14.0	64.8	

Kuten taulukosta 1 nähdään, kaikki maadoitusratkaisut toimivat tehokkaasti käyttötarkoituksessaan. Akseli on hyvin maadoitettu jokaisella ratkaisulla myös roottorin seisoessa paikallaan. Hiiliharjojen maadoitustehokkuus osoittautui muita ratkaisuja marginaalisesti paremmaksi.

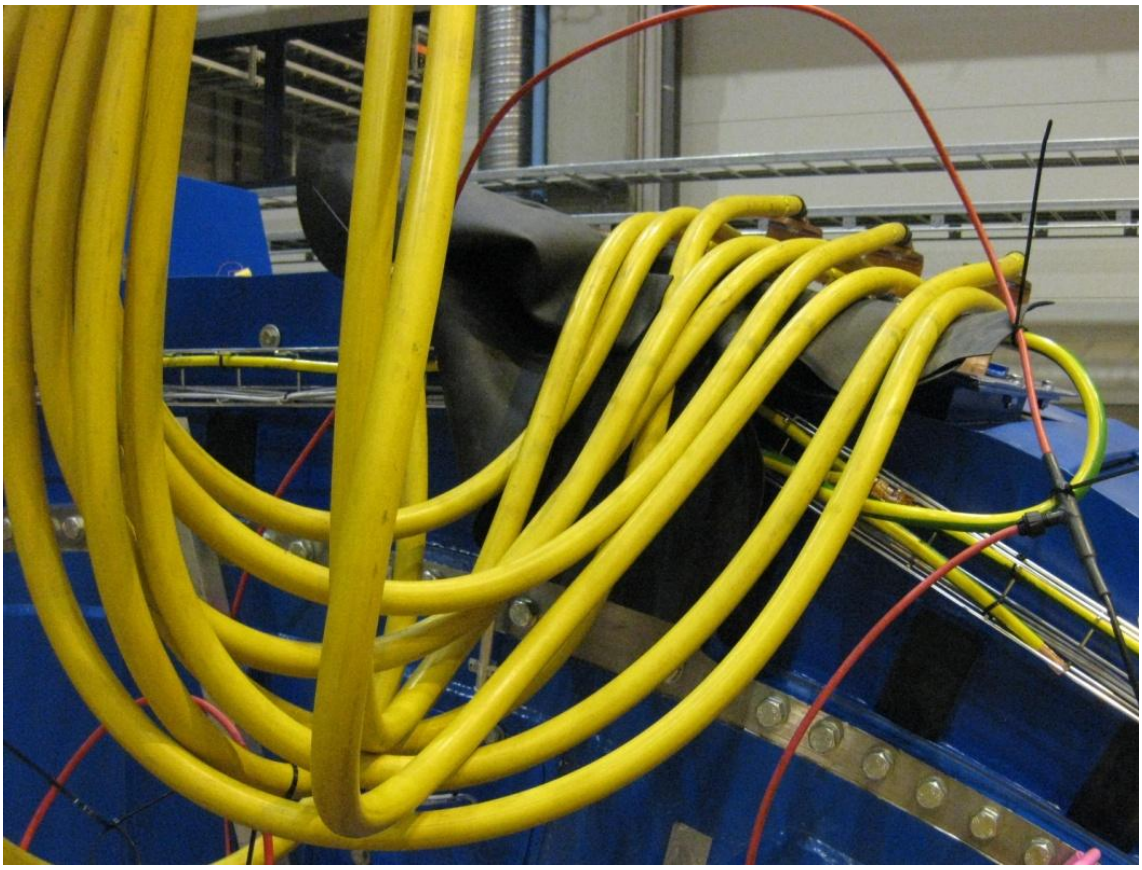
Mittaustulosten ohessa on hyvä muistaa kappaleen 3.3.4 maadoitusratkaisujen esittelyt, jossa kerrottiin eri ratkaisujen hyvistä ja huonoista puolista. Kun otetaan huomioon

myös taulukossa 1 esitetyt maadoitusratkaisujen hinnat, vaikuttaa maadoitusrengasvalmistaja Inpro käytännössä erittäin mielenkiintoiselta vaihtoehdolta akselimaadoituksen toimittajaksi.

Pitkän toiminta-ajan testauksia maadoitusvaihtoehdoille ei tehty, mutta vastaavia tutkimuksia löytyy paljon kirjallisuudesta, esimerkiksi lähteestä [35]. Maadoitusrenkaissa havaittiin lyhyissä testiajoissa mikrokuituharjojen irtoilua. Todennäköisesti mikrokuituharjojen irtoilu kuitenkin vähenee, kun maadoitusrengas on ajan myötä ”totuttautunut” akselisovitukseen. Mittauksissa käytetyn sähkökoneen akselin pinta oli epätasainen, mikä varmasti vaikuttaa mikrokuituharjasten irtoiluun ja hiiliharjojen mekaaniseen kulumiseen.

4.2.2 Yhteismuotoisen virran mittaus

Sähkökoneen yhteismuotoinen virta mitattiin ympäröimällä kaikkien kolmen vaiheen syöttöjohtimet Rogowskin virtalenkillä. Tällä mittausjärjestelyllä saatiin mitattua vaiheiden summavirta. Taajuusmuuttajan ajaessa konetta yhteismuotoisesta virrasta erottui korkeataajuisia virtapiikkejä. Kuvassa 31 on esitetty yhteismuotoisen virran käyrämuoto ja kuvassa 29 yhteismuotoisen virran mittausjärjestely. Kuten kuvasta 29 havaitaan, on virranmittauslenkki yhteismuotoisen virran mittaukseen turhan pitkä. Tästä johtuen häiriöiden indusoituminen virtalenkkiin oli mahdollista. Yhteismuotoisen virran huippuarvoksi mitattiin tyhjäkäynnissä 126 A. Koneen yhteismuotoinen virta voi olla jopa 20 % koneen nimellisestä vaihevirrasta [20]. Mittauksiin käytetyn kestomagneettitahtikoneen nimellisen vaihevirran ollessa noin 4000 A, on yhteismuotoisen virran osuus vaihevirrasta pieni, vaikkakin yhteismuotoinen virta on mitattu vain yhdellä konvertterilla ajettuna.



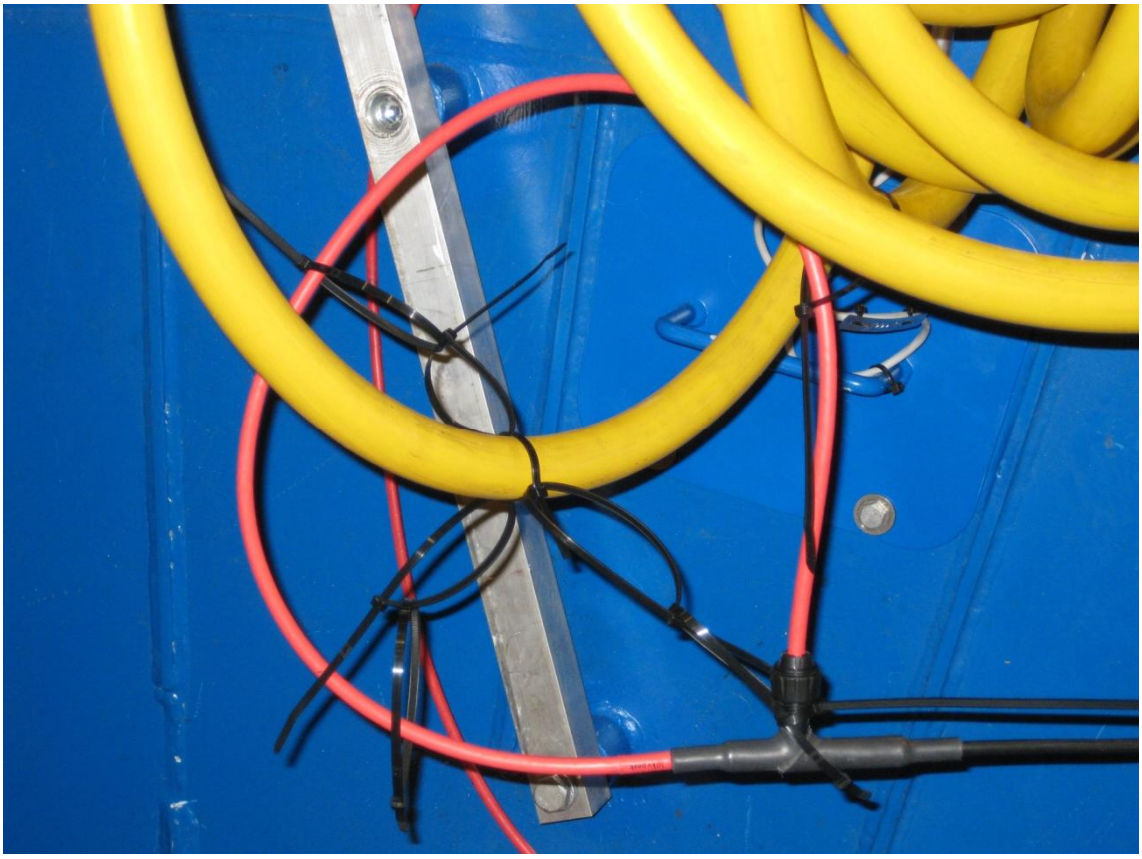
Kuva 29. Yhteismuotoisen virran mittausjärjestely

4.2.3 Maadoitusvirran mittaus

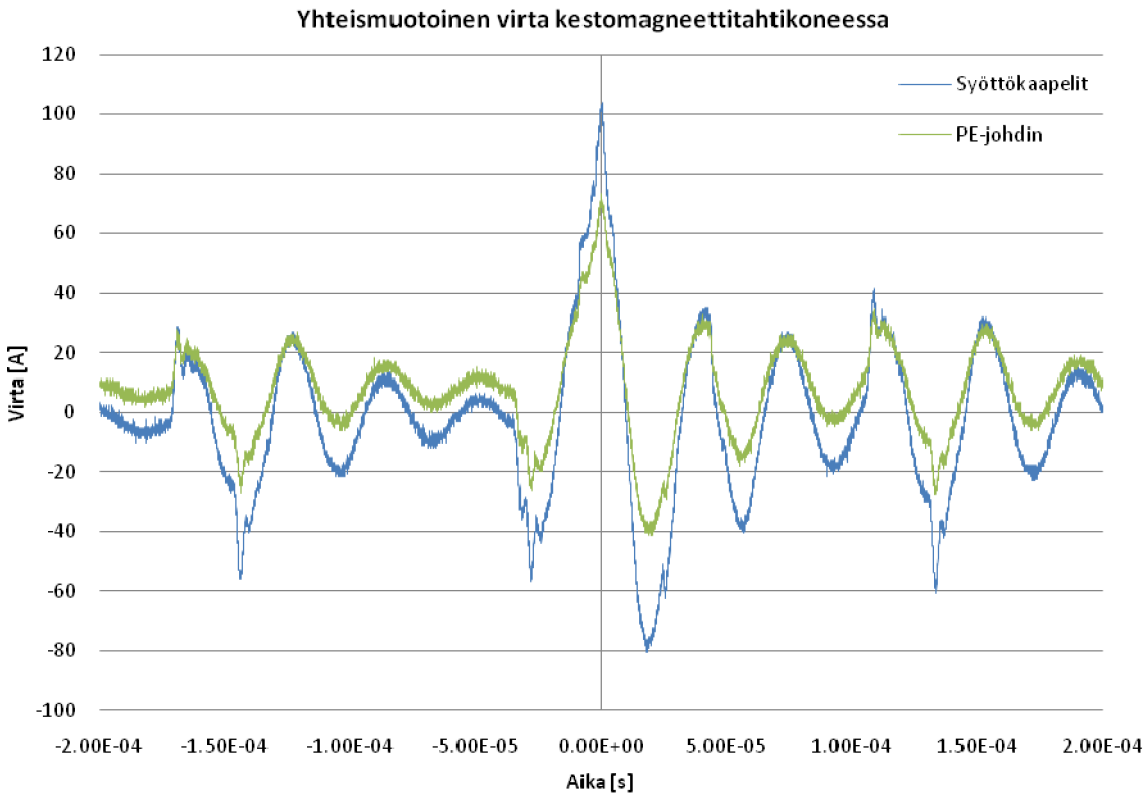
Yhteismuotoinen virta on tarkoitus maadoittaa sähkökoneen PE-pisteestä PE-johtimella konvertterin maahan. Mittauksissa pyrittiin saamaan kaikki yhteismuotoinen virta kulkemaan maadoitusvirtana PE-johdinta pitkin eristämällä kone pedistä. Koneen täydellisessä eristämisessä ei onnistuttu, sillä koneen runko näytti eristysvastus- sekä yleismittarilla mitattuna olevan sähköisessä kontaktissa metallisen pedin kanssa. Koneen valtavan koon ja projektin aikataulun vuoksi koneelle ei tehty toista eristysyritystä.

PE-johtimen maadoitusvirta mitattiin tästä huolimatta, jotta voitiin todeta suurimman osan yhteismuotoisesta virrasta kulkevan PE-johdinta pitkin konvertterille. Kuvassa 23 esitettiin mittausjärjestely PE-johtimen maadoitusvirran mittaukseen. Testeissä maadoitusjohdin pyrittiin asettelemaan nippusiteillä 90 asteen kulmaan suhteessa virtalenkkiin sekä mahdollisimman keskelle tätä (kuva 30). Kuva 31 osoittaa, että

yhteismuotoinen virta maadoittuu pääosin PE-johtimen kautta, vaikka osa siitä kulkee maahan jotakin toista reittiä, kuten sähkökoneen jalkojen kautta metallipetiin.



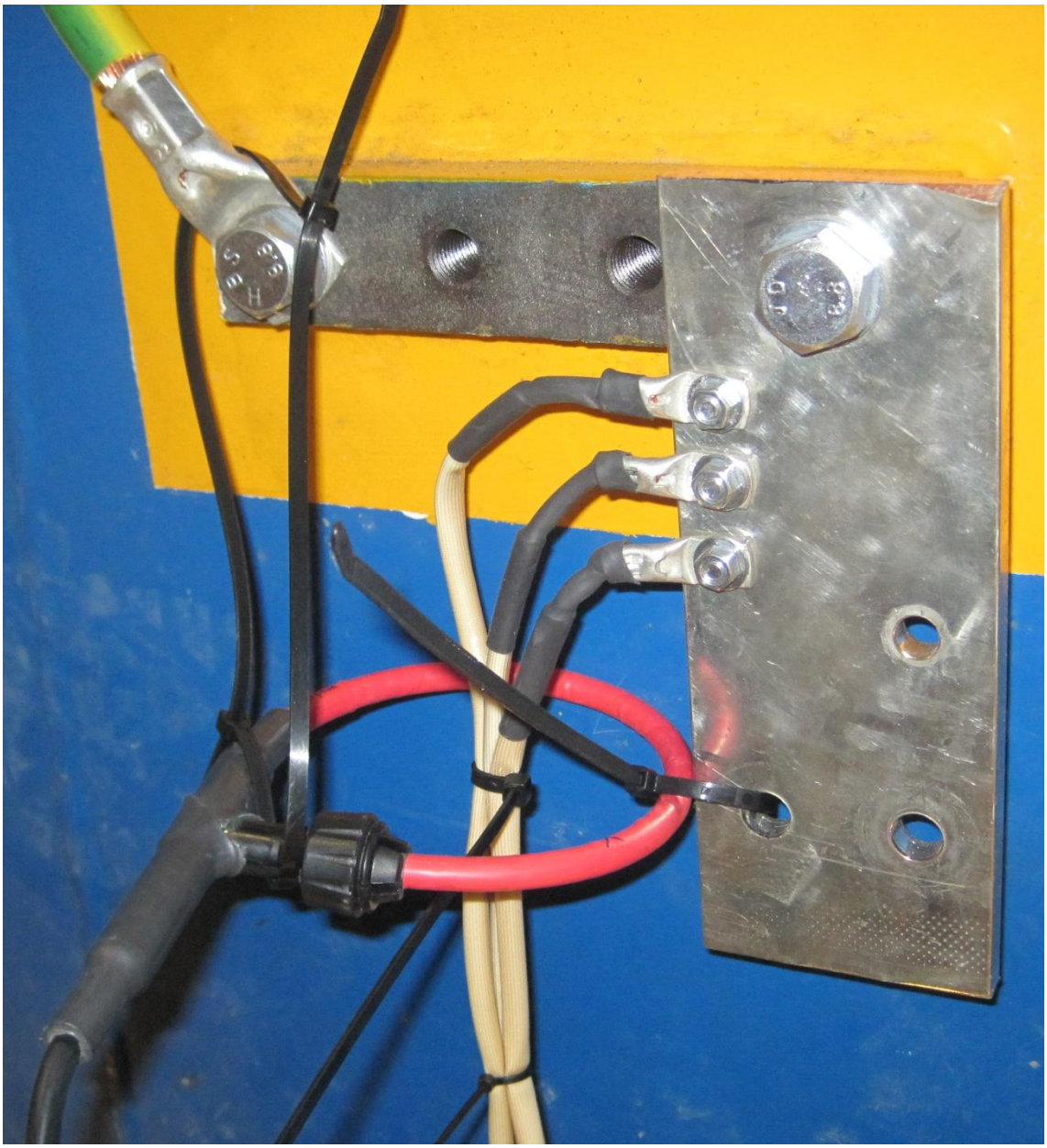
Kuva 30. PE-johtimen maadoitusvirran mittaus PEM-virtalenkillä



Kuva 31. Sähkökoneeseen menevä yhteismuotoinen virta sekä koneesta poistuva maadoitusvirta

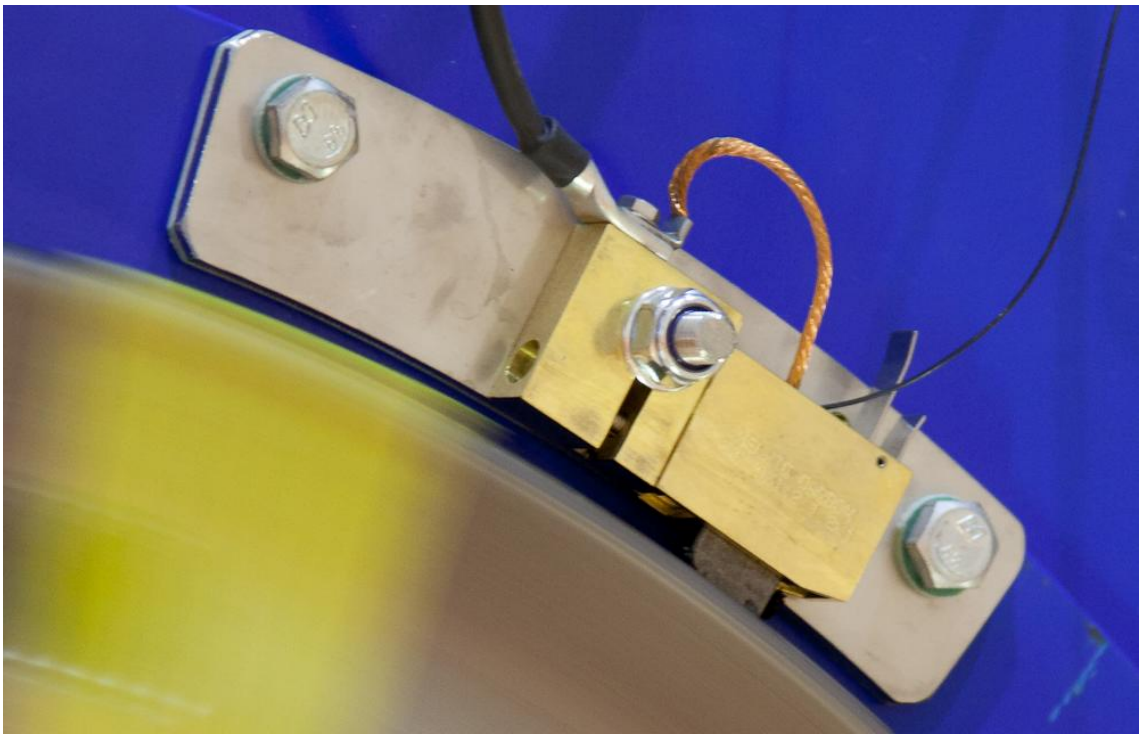
4.2.4 Hiiliharjavirrat ja matalataajuiset kiertovirrat

Laakerivirta voidaan mitata esimerkiksi eristämällä laakeri hyvin paksulla eristeellä ja oikosulkemalla eriste matalaimpedanssisella johtimella. Tämän johtimen virta mitataan virtalenkillä, jonka taajuuskaista on korkea. Kun virtaa mitataan oikosulkevasta johtimesta, täytyy olettaa, ettei laakerivirta pääse kulkemaan tällöin laakerieristeen läpi. Tässä työssä tarkasteltavassa koneessa laakerit on eristetty 2 mm laminaatilla. Kiertävä laakerivirta mitattiin hiiliharjoista ja akselista. Jos hiiliharjoja ja pesäeristeitä ei olisi, sama virta kiertäisi oletettavasti akselista laakereihin ja runkoon. Akselin molempiin päihin oli kiinnitetty kolme hiiliharjaa 120 asteen välein akselin ympärille. Kuvassa 32 on esitetty Rogowski-virtalenkin asettelu runkoon maadoitettujen hiiliharjajohtimien ympärille. Mittaustuloksissa esitetty harjavirta on siis kolmen hiiliharjajohtimen summa.



Kuva 32. Hiiliharjavirtojen mittaaminen PEM-virtalenkillä

Kuvassa 33 on esitetty sähkökoneissa yleisesti käytetyn hiiliharjan eräs malli. Kuten kuvasta 33 näkyy, hiiliharjakokoonpano on eristetty koneen rungosta laminaateilla. Näin hiiliharjavirta saadaan maadoitettua yhtä johdinta pitkin koneen runkoon.



Kuva 33. Sähkökoneen hiiliharja, joka on sähköisessä yhteydessä runkoon vain johdinta pitkin

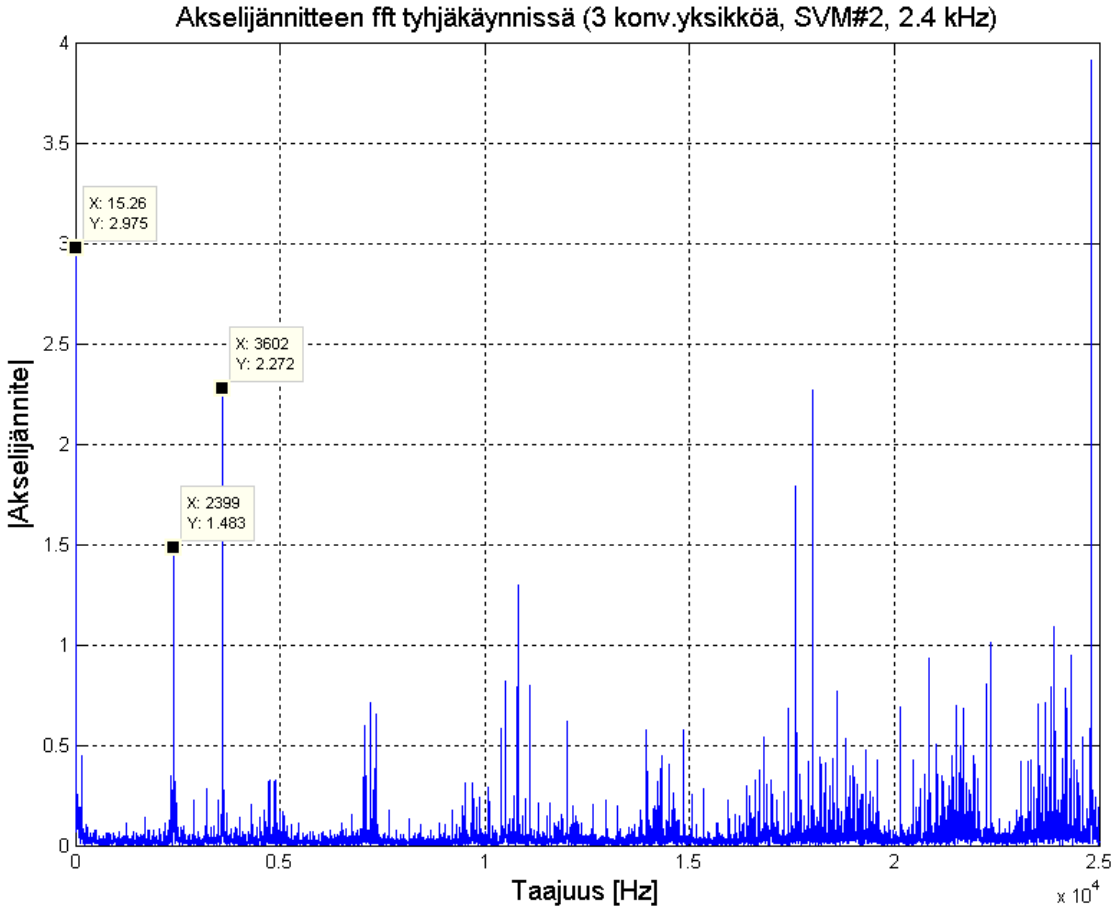
Matalataajuinen kiertovirta jouduttiin arvioimaan epäsuorasti, sillä käytettävissä olevat PEM-virtalenkit ovat optimoitu korkeataajuisten laakerivirtojen mittaukseen (taajuuskaistan alaraja noin 1770 Hz). Kappaleessa *Akselin maadoitus hiiliharjalla* yhden hiiliharjan DC-resistanssiksi akselista hiiliharjajohtimen päähän mitattiin mikro-ohmimittarilla 45 mΩ. Käyttämällä hiiliharjan DC-resistanssia, voitiin arvioida segmentoinnista johtuvan kiertovirran ja roottorin epäkeskisyydestä johtuvan akselijännitteen aiheuttaman matalataajuisen virran suuruus. Koneesta mitattiin tyhjäkäynnissä kuvan 25 mukainen akselijännite akselin ja rungon väliltä hiiliharjat kytkettyinä. Akselijännitteen matalataajuisen komponentin RMS-arvoa U ja kolmen hiiliharjan rinnan kytkennän DC-resistanssia R käyttämällä, voidaan ohmin lain mukaisesti segmentoinnin ja roottorin epäkeskisyyden aiheuttamaksi matalataajuiseksi virraksi estimoida

$$I = \frac{U}{R} = \frac{2\ \mathrm{V}/\sqrt{2}}{(45\ \mathrm{m\Omega})^4 / 2(45\ \mathrm{m\Omega})^2(45+45)\ \mathrm{m\Omega}} \approx 126\ \mathrm{A}. \tag{10}$$

Matalataajuisen virran amplitudin lisäksi sen taajuus voitiin määrittää akselijännitteen mittauksesta. Kuvan 25 korkeataajuisen akselijännitteen seasta erottuu selkeästi matalataajuinen aaltomuoto. Tämän aaltomuodon kahden huipun välinen aika on 65.5 ms. Akselijännitteen matalataajuiseksi komponentiksi saadaan

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{65.5\ \mathrm{ms}} = 15.26\ \mathrm{Hz}, \tag{11}$$

joka vastaa syöttötaajuutta. Akselijännitteen taajuussisältöä analysoitiin myös *Matlab*-ohjelmistolla. Kuvan 34 fft-spektristä erottuu merkittävä syöttötaajuinen akselijännite. Myös verkkopuolen kytkentätaajuus 3.6 kHz, moottoripuolen kytkentätaajuus 2.4 kHz sekä näiden monikerrat erottuvat selkeästi.



Kuva 34. Akselijännitteen fft-analyysi

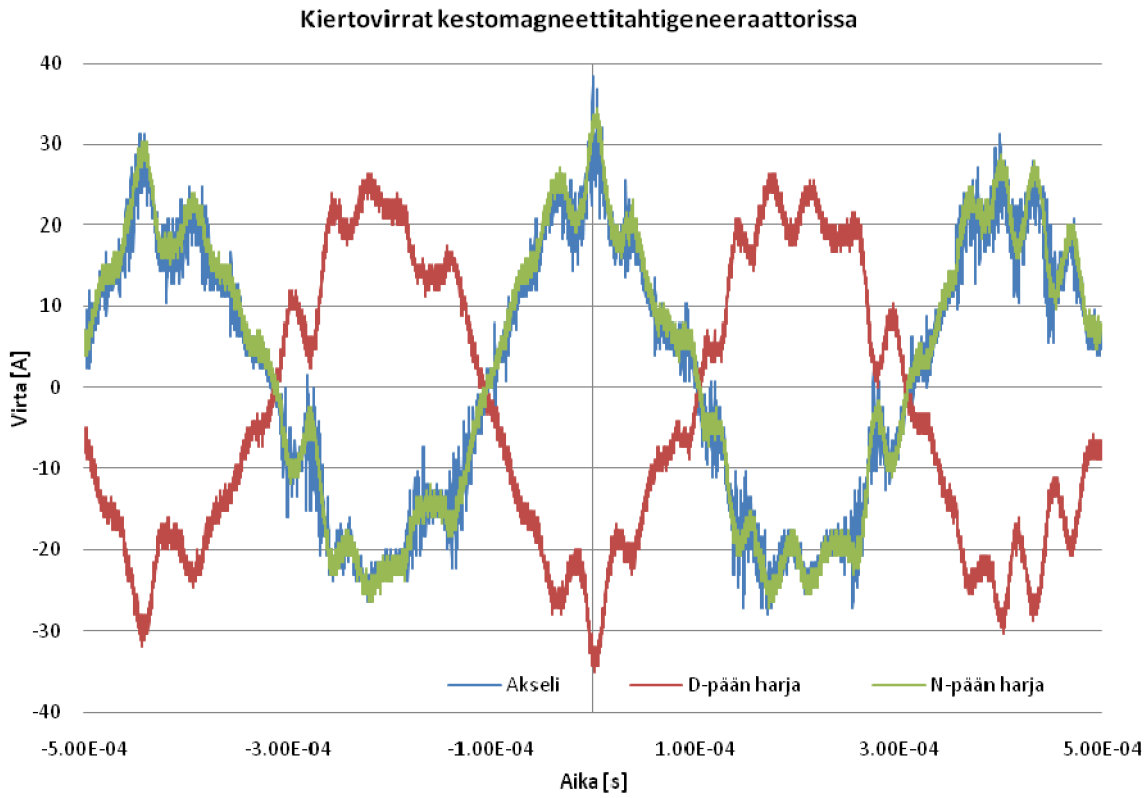
Syöttötaajuuden löytyminen akselijännitteestä selittyy kappaleessa 1.2 kerrotun segmentoinnin ja roottorin epäkeskisyyden aiheuttamista ilmiöistä. Mittauksissa käytetyllä koneella on 120 napaa. Staattori on segmentoitu 12 osaan, joten 12 liitoskohtaa antaa yhtälön (1) perusteella

$$\frac{2N_{\mathrm{j}}}{N_{\mathrm{p}}} = \frac{2 \cdot 12}{120} = \frac{24}{120} = \frac{1}{5} \tag{12}$$

staattorin segmentoinnin aiheuttaman matalataajuisen kiertovirran taajuudeksi syöttötaajuuden.

4.2.5 Akselivirtamittaukset

Korkeataajuinen kiertävä akselivirta mitattiin kiinnittämällä pitkä PEM-virtalenkki koneen rungon sisäpuolelle akselin ympärille. Kuvan 35 mittaushetkellä konetta ajettiin kolmella konvertteriyksiköllä (15.1 rpm, 4.3 MW) generaattorina ja mitattiin akselivirta sekä akselin molempien päiden hiiliharjavirrat. Kuvasta 35 voidaan havaita, kuinka sama kiertovirta kulkee akselin, hiiliharjojen ja koneen rungon muodostamaa lenkkiä. D-pään ja N-pään virrat ovat päinvastaiset, sillä kiertovirta kulkee niiden läpi luonnollisesti vastakkaisiin suuntiin. Kuvassa 35 näkyvän kiertovirran aaltomuodon dominoiva taajuus on moottoripuolen kytkentätaajuus 2.4 kHz.



Kuva 35. Kestomagneettitahtigeneraattorin kiertovirta hiiliharjoissa ja akselilla

4.2.6 Tyhjäkäyntimittaukset yhdellä konvertteriyksiköllä nimellisnopeudella

Generaattoria pyöritettiin moottorina 15.6 rpm nimellisnopeudella yhdellä konvertteriyksiköllä ja vertailtiin modulaattorityypin sekä kytkentätaajuuden vaikutusta koneessa esiintyviin kiertovirtoihin. Mittauksissa käytettiin kolmea eri moottoripuolen kytkentätaajuutta (2.0, 2.4 ja 3.0 kHz) sekä kolmea eri modulaattorityyppiä. Verkkopuolen kytkentätaajuus oli 3.6 kHz.

Tarkempaa tietoa käytetyistä modulaattoreista ei voi antaa luottamuksellisuussyistä, mutta kolme mittauksissa käytettyä ohjelmapohjaista modulaattorityyppiä olivat [38]:

- SVM#1, symmetrinen vektorimodulaattori symmetrisillä nollavektoreilla
- SVM#2, yksi kytkin johtaa aina 60 astetta positiiviseen tai negatiiviseen DC-kiskoon. Tämä vähentää kytkinhäviöitä, koska ylemmät ja alemmat kytkimet johtavat yhtä paljon ja lämpenevät tasaisesti. Kytkemisen aiheuttama taajuusspektri on kapea

- SVM#3, yksi kytkin johtaa aina 120 astetta negatiiviseen DC-kiskoon. Tämä johtaa ylemmän ja alemman kytkimen kuormitusepäsymmetriaan sekä kytkemisen aiheuttaman taajuusspektrin laajenemiseen. Kytkinhäviöt kuitenkin vähenevät

Laakereiden lämpötiloja luettiin PT100-antureilla testien ajan. D-pään laakerin lähtölämpötila oli 27.5 °C ja loppulämpötila 35.5 °C. N-pään lämpötilat olivat vastaavasti 26.5 °C ja 32.9 °C. Vaikka lämpötilan kasvu oli D-päässä 8 °C, uskottiin vaikutuksen laakerivirtojen kulkuun olevan mitätöntä.

Taulukoissa 2-5 on esitetty tulokset eri avaruusvektorimodulaattorityyppien (SVM#1, SVM#2, SVM#3) sekä eri kytkentätaajuuksien (2.0 kHz, 2.4 kHz, 3 kHz) vaikutuksesta yhteismuotoisen-, akseli-, PE-johtimen sekä N-pään hiiliharjavirran RMS- ja huippuarvoihin. Taulukoissa 2 ja 3 mittaustulokset on järjestelty kytkentätaajuuksien mukaan ja taulukoissa 4 ja 5 modulaattorityyppien mukaan. Kussakin kolmen rivin sarjassa vaalean vihreät solut tarkoittavat kullakin modulaattorityypillä tai kytkentätaajuudella mitattua alinta virran arvoa ja vaalean siniset puolestaan korkeinta arvoa. Tällä on pyritty selkeyttämään taulukkojen lukemista. Taulukoista 3 ja 5 puuttuu yhdistelmän 3 kHz-SVM#3 RMS-arvot, sillä niiden tallennus oli epäonnistunut.

Taulukko 2. Eri modulaattorityyppien (SVM #1 - #3) ja kytkentätaajuuksien f_{sw} vaikutukset sähkökoneen yhteismuoto- ja kiertovirtaan (järjestelty kytkentätaajuuksien mukaan), mittaus 1

f_{sw} [kHz]	SVM	Yhteism. [Arms]	Yhteism. [Apiikki]	PE [Arms]	PE [Apiikki]	Harja [Arms]	Harja [Apiikki]
2.0	#1	18.1	113.6	14.4	83.2	4.9	16.0
2.0	#2	17.8	122.4	14.3	84.0	4.4	14.6
2.0	#3	17.8	96.0	14.3	70.4	4.8	16.4
2.4	#1	18.6	123.2	14.5	85.6	4.2	13.6
2.4	#2	18.0	117.6	14.3	82.4	4.6	14.6
2.4	#3	18.0	92.0	14.2	67.2	4.2	13.2
3.0	#1	19.1	120.0	14.7	87.2	3.8	11.8
3.0	#2	18.6	119.2	14.8	84.8	3.5	11.0
3.0	#3	18.8	97.6	14.7	67.2	3.9	12.0

Taulukko 3. Eri modulaattorityyppien (SVM #1 - #3) ja kytkentätaajuuksien f_{sw} vaikutukset sähkökoneen yhteismuoto- ja kiertovirtaan (järjestelty kytkentätaajuuksien mukaan), mittaus 2

f_{sw} [kHz]	SVM	Yhteism. [Arms]	Yhteism. [Apiikki]	Akseli [Arms]	Akseli [Apiikki]	Harja [Arms]	Harja [Apiikki]
2.0	#1	18.5	121.6	5.0	21.2	5.0	16.0
2.0	#2	17.8	122.4	4.8	17.8	4.9	16.4
2.0	#3	17.8	100.0	4.7	16.8	4.8	16.2
2.4	#1	18.8	117.6	4.8	16.4	4.8	14.8
2.4	#2	18.1	126.4	4.8	17.6	4.9	14.4
2.4	#3	18.0	96.0	4.8	17.0	4.8	14.9
3.0	#1	19.0	128.0	4.1	15.2	4.1	13.0
3.0	#2	18.7	120.0	3.9	17.6	3.9	12.2
3.0	#3	-	100.0	-	14.4	-	11.8

Taulukko 4. Eri modulaattorityyppien (SVM #1 - #3) ja kytkentätaajuuksien f_{sw} vaikutukset sähkökoneen yhteismuoto- ja kiertovirtaan (järjestelty modulaattorityyppien mukaan), mittaus 1

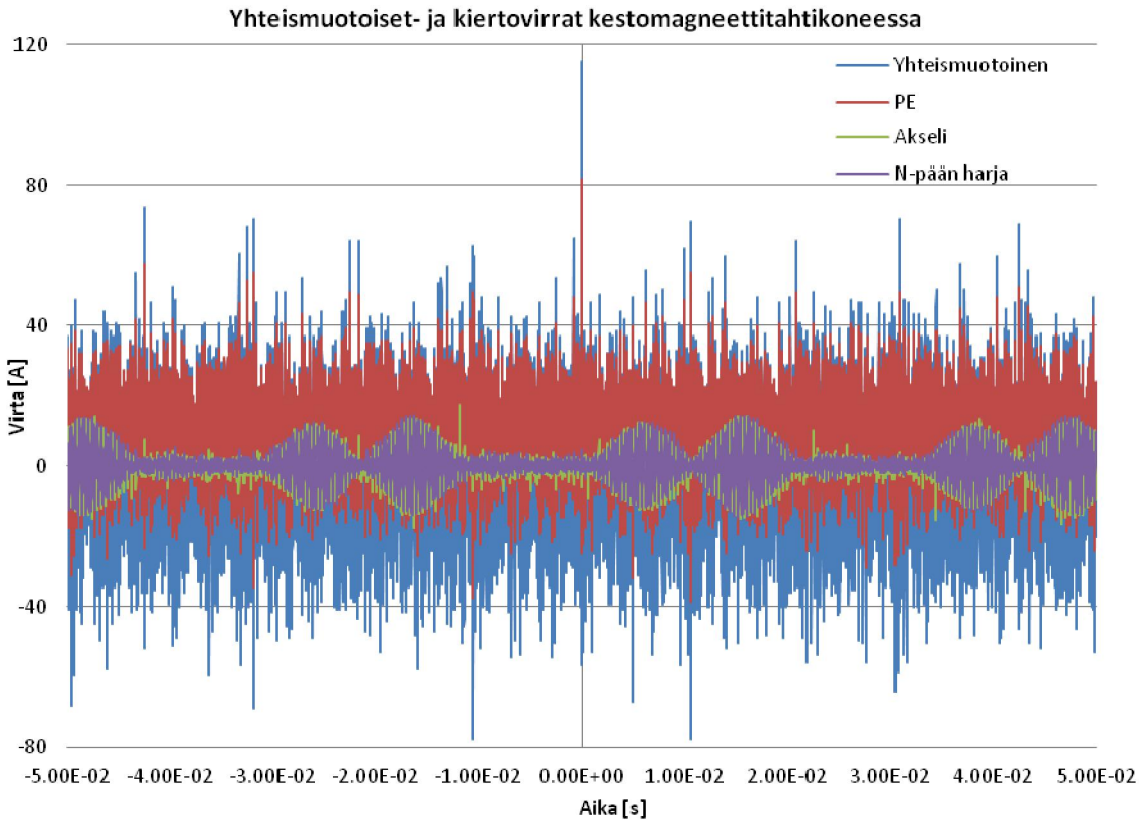
f_{sw} [kHz]	SVM	Yhteism. [Arms]	Yhteism. [Apiikki]	PE [Arms]	PE [Apiikki]	Harja [Arms]	Harja [Apiikki]
2.0	#1	18.1	113.6	14.4	83.2	4.9	16.0
2.4	#1	18.6	123.2	14.5	85.6	4.2	13.6
3.0	#1	19.1	120.0	14.7	87.2	3.8	11.8
2.0	#2	17.8	122.4	14.3	84.0	4.4	14.6
2.4	#2	18.0	117.6	14.3	82.4	4.6	14.6
3.0	#2	18.6	119.2	14.8	84.8	3.5	11.0
2.0	#3	17.8	96.0	14.3	70.4	4.8	16.4
2.4	#3	18.0	92.0	14.2	67.2	4.2	13.2
3.0	#3	18.8	97.6	14.7	67.2	3.9	12.0

Taulukko 5. Eri modulaattorityyppien (SVM #1 - #3) ja kytkentätaajuuksien f_{sw} vaikutukset sähkökoneen yhteismuoto- ja kiertovirtaan (järjestelty modulaattorityyppien mukaan), mittaus 2

f_{sw} [kHz]	SVM	Yhteism. [Arms]	Yhteism. [Apiikki]	Akseli [Arms]	Akseli [Apiikki]	Harja [Arms]	Harja [Apiikki]
2.0	#1	18.5	121.6	5.0	21.2	5.0	16.0
2.4	#1	18.8	117.6	4.8	16.4	4.8	14.8
3.0	#1	19.0	128.0	4.1	15.2	4.1	13.0
2.0	#2	17.8	122.4	4.8	17.8	4.9	16.4
2.4	#2	18.1	126.4	4.8	17.6	4.9	14.4
3.0	#2	18.7	120.0	3.9	17.6	3.9	12.2
2.0	#3	17.8	100.0	4.7	16.8	4.8	16.2
2.4	#3	18.0	96.0	4.8	17.0	4.8	14.9
3.0	#3	-	100.0	-	14.4	-	11.8

Laakerivirtojen aiheuttamien vaurioiden kannalta oleellisinta tuloksissa olisivat kiertovirroissa esiintyvät piikkiarvot. Taulukoissa esiintyvät virran piikkiarvot ovat valitettavasti vain yhden ainoan taltioinnin arvoja, eikä niistä näin voi vetää varmoja johtopäätöksiä eri modulaattorityyppien ja kytkentätaajuuksien välille. Varmempaan tulokseen päästäisiin keskiarvottamalla lukuisten mittausten piikkiarvot. Moninkertaisiin, saman mittauspisteen taltiointeihin ei kyseisessä projektissa kuitenkaan ollut aikaa. Korkeimmat piikkiarvot taltioitiin niin, että oskilloskoopin liipaisuraja pidettiin korkealla ja sitä laskettiin alaspäin hyvin hitaasti, jolloin mittauksista saatiin tallennettua kaikkein korkein piikkiarvo. Oskilloskoopilla tehtiin lisäksi useampia taltiointeja ja näistä vain korkeimmat piikkiarvot sisältävä mittaustulos tallennettiin myöhempää tarkastelua varten. Tällä tavalla päästiin aivan satunnaista otosta parempaan lopputulokseen.

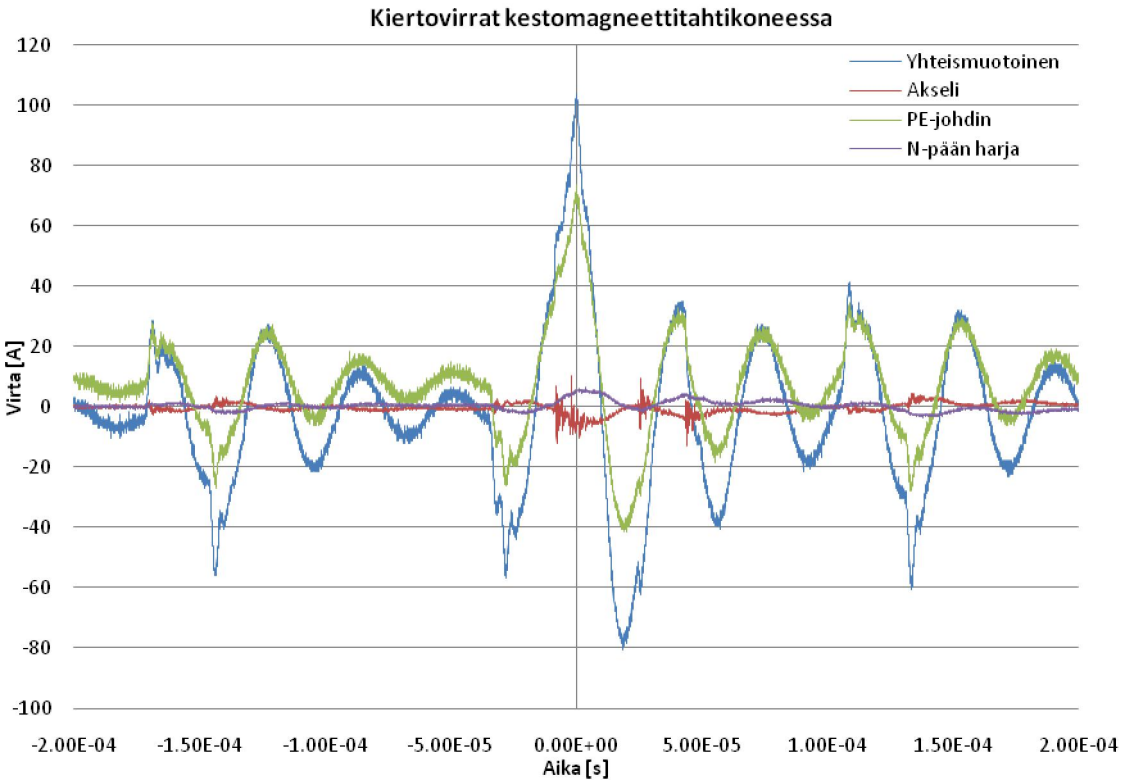
Kuvassa 36 on esitetty hyvä erimerkki yhteismuotoisen virran piikkien satunnaisuudesta. Modulaattorityyppi on ollut mittaushetkellä SVM#2 ja kone on pyörinyt nimellisnopeudella. Suurin osa virtapiikeistä on alle 80 A, mutta yksi virtapiikki yltää miltei 120 A:iin saakka. Tällaiset satunnaiset piikit eivät vaikuta virran RMS-arvoon lainkaan, mutta voivat esimerkiksi akselilla kulkevassa kiertovirrassa olla juuri se laukaiseva tekijä, joka johtaa lopulta laakerieristeen heikkenemiseen ja laakerin vaurioitumiseen.



Kuva 36. Yhteismuotoinen- ja kiertovirta nimellisnopeudella pyörivässä kestomagneetti-tahtikoneessa (kytkentätaajuus 2.4 kHz, modulaattorityyppi SVM#2)

Kiertovirtamittausten tuloksista voidaan lukea, että RMS-arvoltaan saman suuruinen kiertovirta kiertää akselin ja hiiliharjan läpi (taulukot 3 ja 5), mutta piikkiarvot ovat akselivirrassa hieman korkeammat. Akselivirran virtapiikkejä havainnollistaa kuva 37, jonka akselivirran aaltomuotoa kannattaa verrata N-pään hiiliharjan läpi kulkevaan kiertovirtaan. Hiiliharjavirran piikkiarvojen keskiarvo eri modulaattorityypeillä ja kytkentätaajuuksilla oli 14.1 A, kun taas vastaava arvo akselivirrassa oli 17.l A. Tähän ilmiöön löytyy ainakin kolme mahdollista selitystä:

- 7 metrisen PEM-virtalenkin koneen sisältä mittaamasta akselivirrasta osa on häiriötä
- osa virtapiikeistä pääsee 2 mm laakerieristyksen läpi, joten ne eivät voi näkyäkään mitatussa hiiliharjavirrassa
- virtapiikit kytkeytyvät kapasitiivisesti sellaiseen virtapiiriin, jota ei ole mitattu



Kuva 37. Yhteismuotoinen virta sekä kiertovirrat kestomagneettitahtikoneessa

Kun akselilla kiertää matala- ja korkeataajuisia komponentteja sisältävä akselivirta, nousevat akselivirran piikit todella korkeiksi. Edellä estimoitiin matalataajuisen virran RMS-arvon olevan 126 A. Jo tämäkin virta yksistään nostaisi laakereiden näennäisvirrantiheyden vaaralliselle

$$J_\mathrm{b} = \frac{I}{A_\mathrm{H}} = \frac{126\ \mathrm{A}}{366.17\ \mathrm{mm}^2} \approx 0.34\ \mathrm{A/mm}^2, \tag{13}$$

yli 0.1 A/mm^2 tasolle. Laakereiden eristäminen on täten perusteltua.

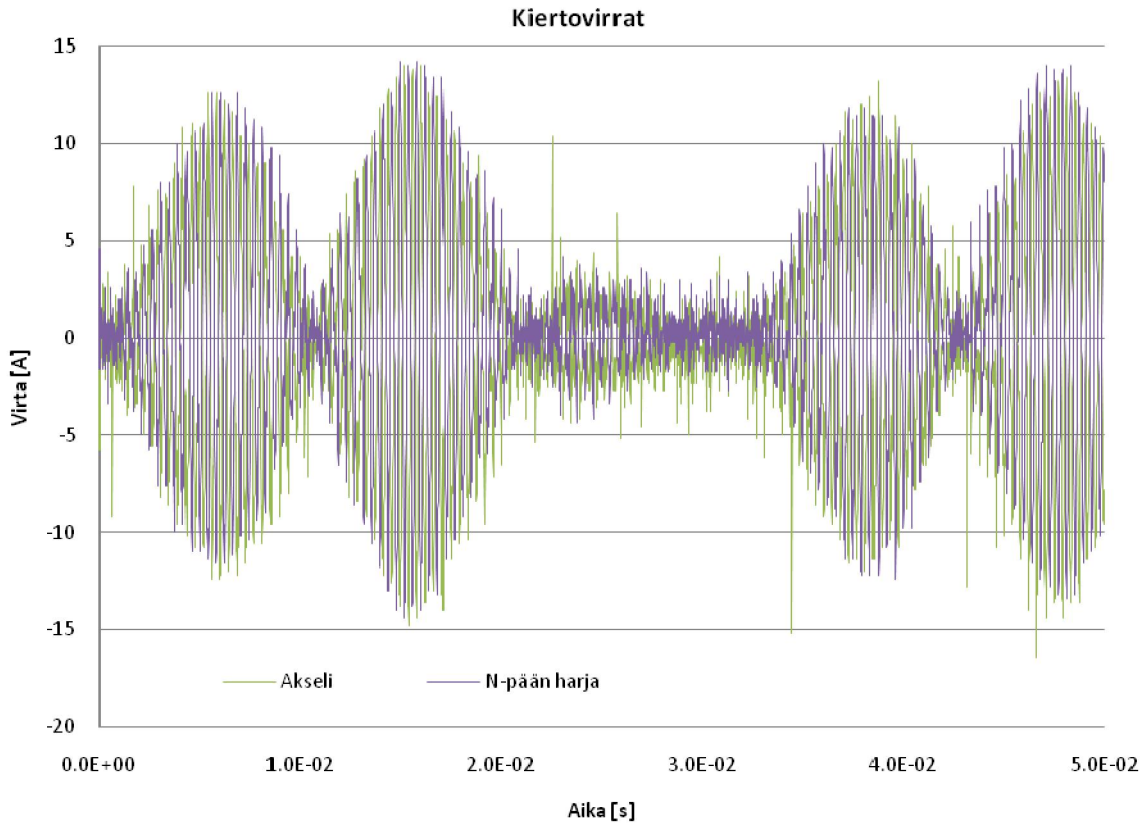
Kun koneen akseli maadoitetaan esimerkiksi hiiliharjoilla, ei laakerieristys joudu niin kovan virtarasituksen alaiseksi. Akselivirta jakautuu hiiliharja- ja laakeri-impedanssien suhteen. Kokemukseen perustuen hiiliharjojen impedanssi voi ajan myötä kasvaa. Jos hiiliharjaimpedanssi kasvaa todella suureksi tai maadoitus vioittuu, virran jako

laakereiden ja hiiliharjojen välillä muuttuu merkittävästi. Tässä tapauksessa akselivirta voi läpäistä laakerieristyksen ja kulkea laakerin läpi.

Kuvan 36 akseli- ja harjavirroissa näkyvät säännölliset keilat on tarkemmin esitetty kuvassa 38. Kahden korkeimman keilan huippujen välinen aika *t* on noin 32.1 ms, josta saadaan huippujen toistumistaajuudeksi

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1}{0.0321\ \mathrm{s}} \approx 31.2\ \mathrm{Hz}. \tag{14}$$

Saatu taajuus on kaksinkertainen kestomagneettitahtimoottorin syöttötaajuuteen nähden. Syöttötaajuuden toisia harmonisia voivat aiheuttaa esimerkiksi vaihe-epäsymmetriat. Staattorin segmentoidusta rakenteesta johtuen staattorisegmenttien reunimmaiset käämit eivät ole identtisiä segmentin muiden käämien kanssa. Vyyhden päiden induktanssit eroavat lisäksi hieman toisistaan, sillä segmentointi katkaisee normaalisti konetta kiertävän symmetrisen vyyhden. Nämä seikat voivat selittää syöttötaajuuden toisen harmonisen esiintymisen kiertovirrassa.



Kuva 38. Akseli- ja harjavirrassa näkyvä keilailmiö

Eri modulaattorityyppien ja kytkentätaajuuksien vaikutuksista tämän kokoonpanon yhteismuotoiseen- ja kiertovirtaan voidaan mittausten perusteella päätellä, että kiertovirran suuruuteen vaikuttaa lähinnä kytkentätaajuus ja yhteismuotoisen virran piikkien suuruuteen modulaattorityyppi. Modulaattorityyppi SVM#3 aiheuttaa noin 25 % muita modulaattorityyppejä matalammat yhteismuotoisen virran piikit riippumatta kytkentätaajuudesta, kuten taulukot 4 ja 5 osoittavat. Mittaustulosten perusteella modulaattorityypeillä ei kuitenkaan ole vaikutusta kiertovirtaan.

Taulukoiden 2 ja 3 osoittama ilmiö kytkentätaajuuden vaikutuksesta kiertovirtoihin on mielenkiintoinen. Kytkentätaajuudella 3 kHz kiertovirran RMS-arvo on 2 kHz:n kytkentätaajuutta noin 23 % alempi ja piikkiarvo noin 28 % alempi riippumatta modulaattorityypistä. Kytkentätaajuuteen 2.4 kHz verrattuna vastaavat prosenttilukemat ovat 19 % ja 15 %. Kytkentätaajuuden kasvattaminen 2 kHz:stä 3 kHz:iin näyttäisi siis vaimentavan siis tässä tapauksessa kiertovirtoja.

Mittaustulosten perusteella kiertovirran piikkiarvot ovat noin 12 % yhteismuotoisen virran piikeistä ja RMS-arvot noin 24 % yhteismuotoisen virran RMS-arvoista. Kappaleessa 2.2 kerrottiin kokemusperäisestä 30 % kertoimesta, joka osoittautui mittaustuloksista saatua kerrointa suuremmaksi. Eristepaksuuden estimointia varten 30 % kerroin on varmasti hyvä lähtökohta suunnitteluun. Mittaustuloksista täytyy muistaa, että konetta ajettiin vain yhden konvertterin pyörittämänä. Kolmella konvertterilla ajettuna yhteismuotoisen ja kiertovirran suhteet saattaisivat muuttua.

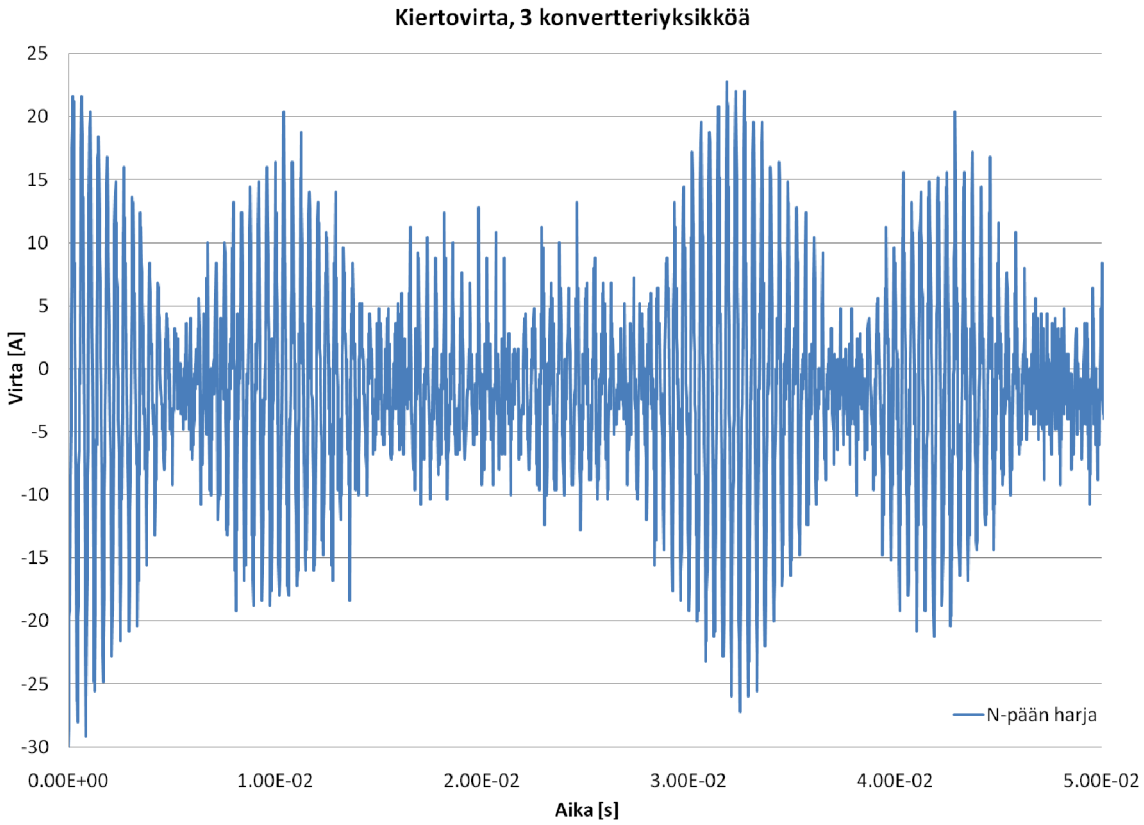
Eri modulaattorityyppien ja kytkentätaajuuksien yhdistelmät toimivat mittausten perusteella paremmin kuin toiset, kuten kappaleessa esiteltyjen taulukoiden vihreistä ja sinisistä riveistä voi huomata. Eri yhdistelmien tuloksia ei kuitenkaan voida käyttää suoraan muille koneille, sillä sähkökoneiden parametrit eroavat toisistaan merkittävästi, eikä eri yhdistelmien käyttäytymistä muissa koneissa voida tämän vuoksi ennustaa. Modulaattorityyppien ja kytkentätaajuuksien vertailut osoittavat kuitenkin kierto- ja yhteismuotoisen virran käyttäytymisestä mielenkiintoisia havaintoja. Tuloksista voidaan päätellä, että juuri tällä kokoonpanolla 3 kHz:n kytkentätaajuuden käyttäminen konvertterissa ehkäisisi laakerivaurioita tehokkaimmin.

4.2.7 Tyhjäkäyntimittaukset kolmella konvertteriyksiköllä

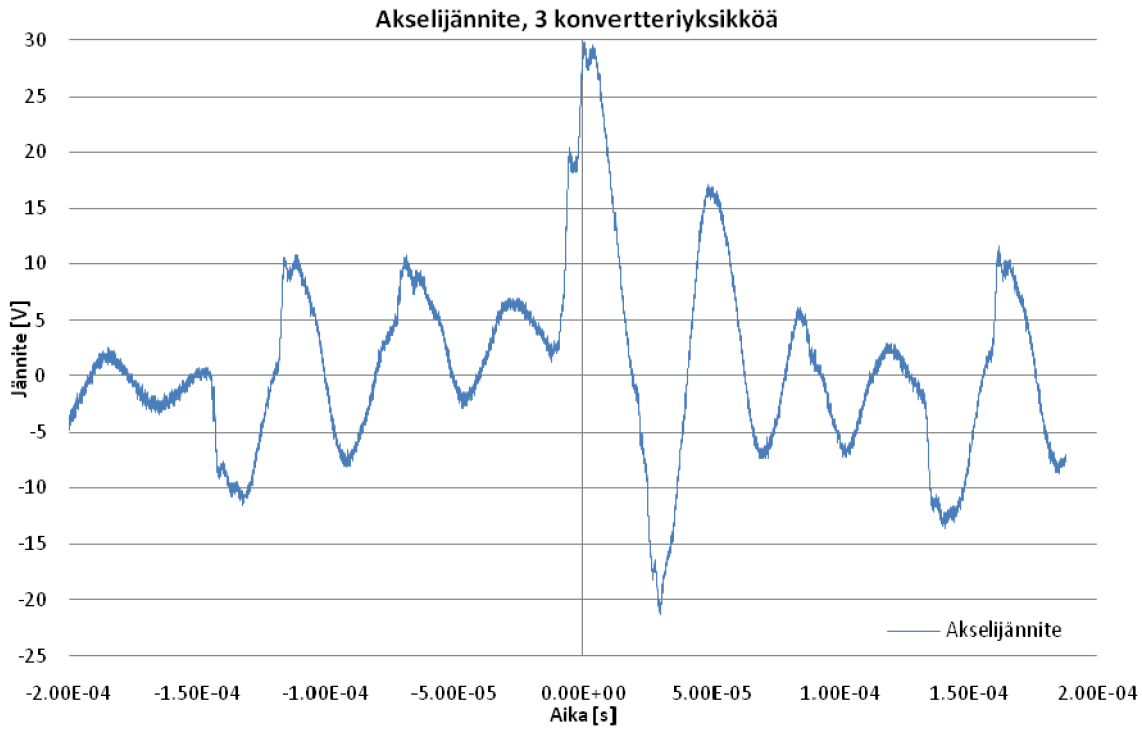
Samaa kestomagneettitahtikonetta ajettiin nimellisnopeudella tyhjäkäynnissä myös kolmella konvertteriyksiköllä syötettynä. Laakerilämmöt molemmissa päissä olivat noin 24 °C testien ajan. Kytkentätaajuutena pidettiin 2.4 kHz ja modulaattorityyppinä SVM#2. Kuten edellä on kerrottu, yhteismuotoisen virran mittaus ei ole enää mahdollista kolmella konvertteriyksiköllä ajaessa.

Kuvassa 39 on esitetty N-pään hiiliharjan läpi kulkeva kiertovirta. Verrattaessa kuvaan 38, voidaan todeta samantapaisen keilamaisuuden toistuvan myös kolmella konvertteriyksiköllä ajettaessa. Kolmella yksiköllä ajettaessa N-pään harjavirran RMS-arvo on 8.0 A, kun se yhdellä yksiköllä oli 4.7 A. Kiertovirran piikit ovat kasvaneet 14.5 A:sta 34.8 A:iin. Tämä on luonnollista, sillä nyt koneen jokainen käämi on syötettynä. Kolmesta käämistä vuotaa korkeataajuista yhteismuotoista virtaa koneen runkoon ja akseliin indusoituu suurempi jännite, joka muuttuu kiertovirraksi. Myöskin

koneen vaihe-epäsymmetria kasvaa, kun kaikissa segmenteissä kiertää virta. Kuvassa 40 on esitetty akselilta mitattu korkeataajuinen jännite.



Kuva 39. Kolmen konvertteriyksikön aiheuttama kiertovirta kestomagneettitahtikoneessa



Kuva 40. Akselijännite nimellisnopeudella, kun konetta syöttää kolme konvertteria

Kuvan 40 akselijännitteen muutosnopeudeksi dU/dt saadaan

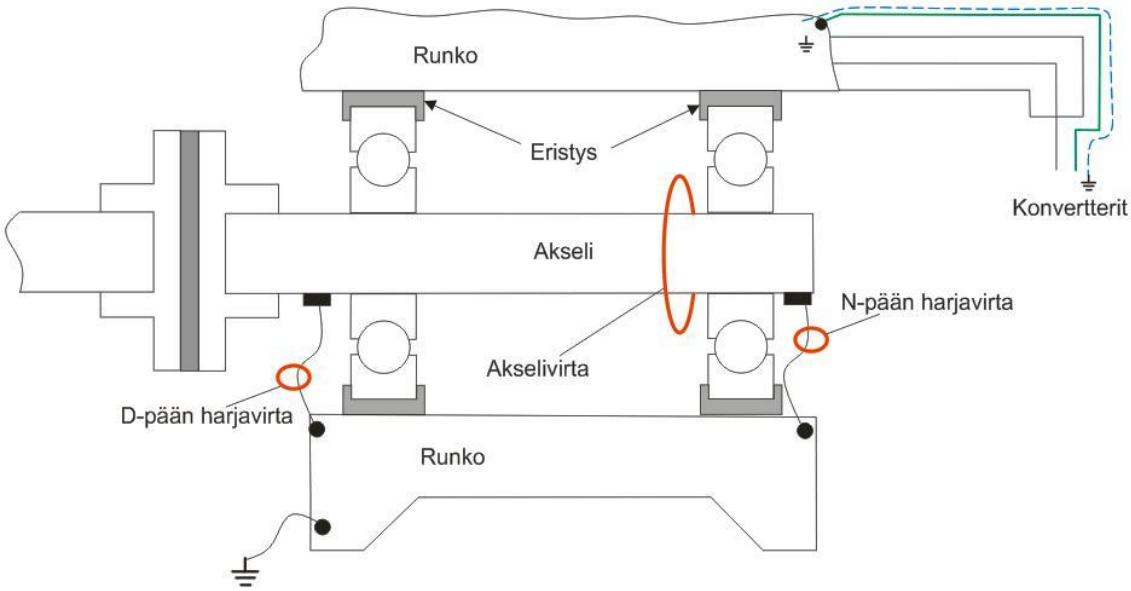
$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = \frac{(24.8-2.8)\ \mathrm{V}}{(0.2113-0.2027)\ \mathrm{ms}} = \frac{22\ \mathrm{V}}{8.6\ \mu\mathrm{s}} \approx 2.6\ \mathrm{V/\mu s}. \tag{15}$$

Saatu akselijännitteen muutosnopeus on esimerkiksi kuvan 18 pulssinleveysmoduloidun vaihejännitteen muutosnopeuteen verrattuna varsin alhainen.

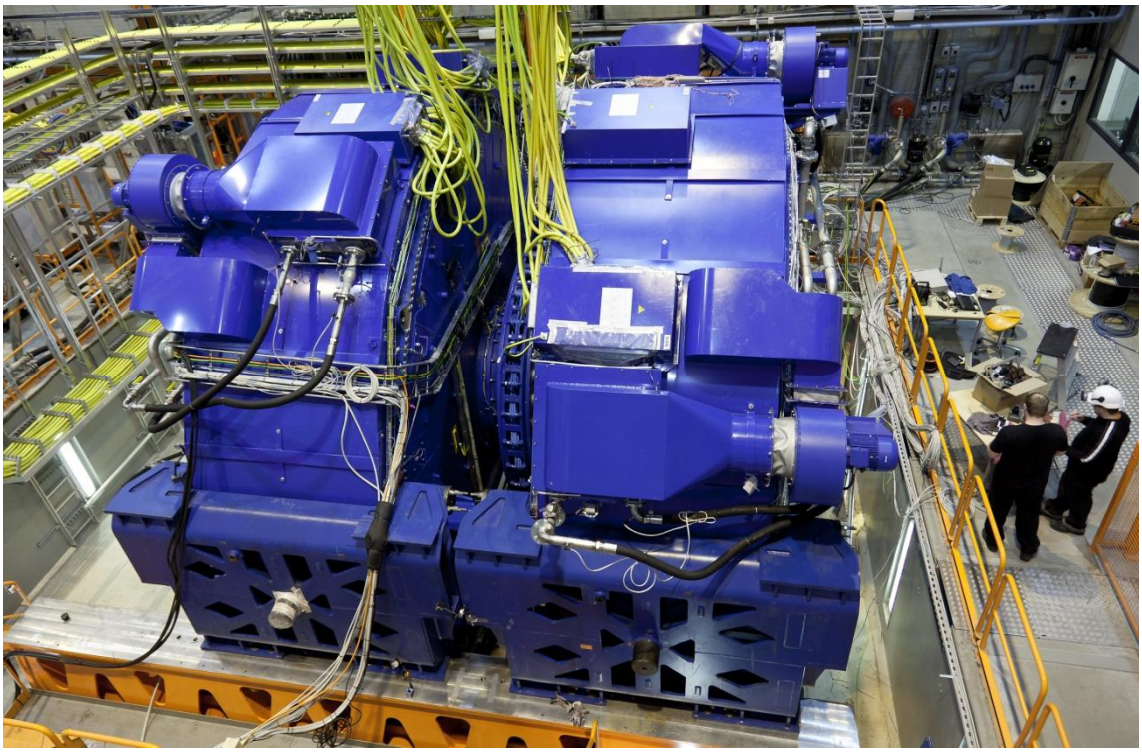
4.2.8 Kuormitusmittaukset

Kuormitusmittauksissa kestomagneettitahtikonetta pyöritettiin generaattorina toisella samanlaisella koneella. Generaattoria kuormitettiin kolmella konvertteriyksiköllä. Kytkentätaajuutena mittauksissa oli 2.4 kHz ja modulaattorityyppinä vaihtuva modulaattorityyppi. Kiertovirta mitattiin akselista ja molemman pään hiiliharjoista. D-pään laakerin lämpötila pysyi koko testin ajan 36 °C:ssa ja N-pään laakerin lämpötila

nousi nopeuden ja tehon kasvaessa 41 °C:sta 48 °C:een. Kuvassa 41 on esitetty mittausjärjestely, kuvassa 42 panoraamakuva käytännön mittausolosuhteista ja taulukkoon 6 on koottu mittaustulokset tehon ja nopeuden funktiona. Johtuen sopivasta napojen lukumäärästä, syöttötaajuus vastaa pyörimisnopeutta (15.6 Hz vastaa 15.6 rpm).



Kuva 41. Mittausjärjestely täyden tehon kiertovirtamittauksiin



Kuva 42. Suuren kestomagneettitahtigeneraattorin kuormitusajo niin kutsuttuna ”back-to-back”-testinä

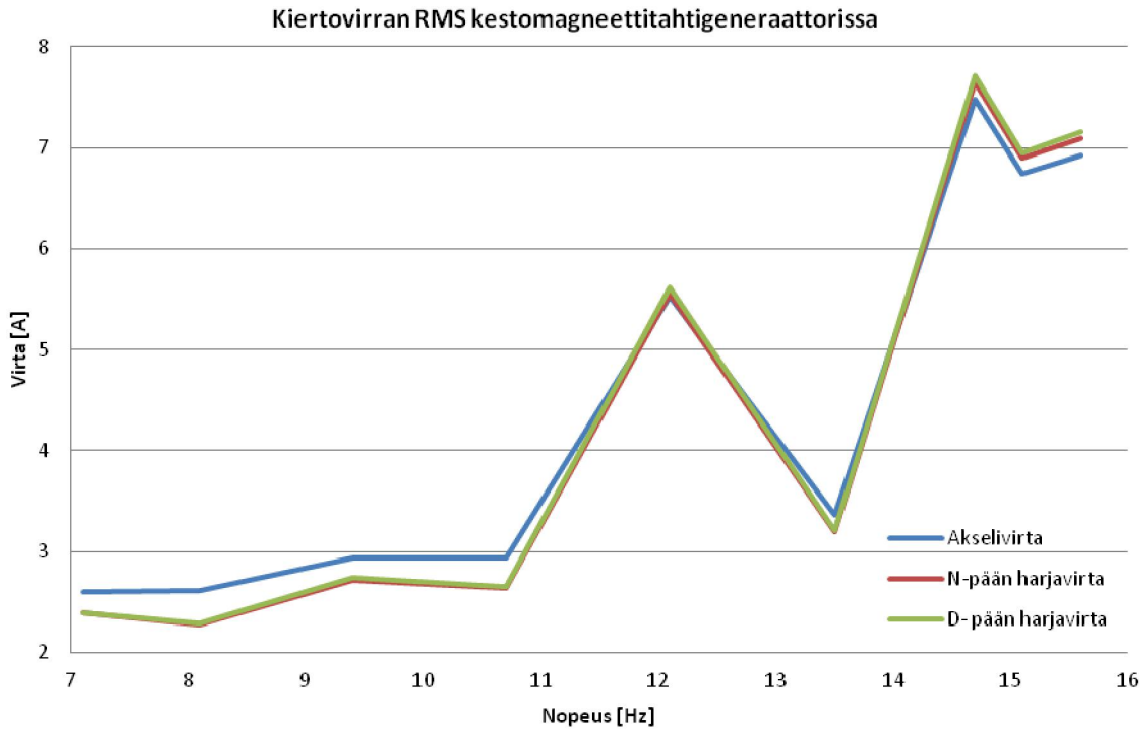
Taulukko 6. Kiertovirrat nopeuden ja tehon funktiona

Taajuus [Hz]	7.1	8.1	9.4	10.7	12.1	13.5	14.7	15.1	15.6
Teho [kW]	105	486	805	1237	1801	2515	3307	4256	4363
Akselivirta [Arms]	3.0	2.6	2.9	2.9	5.5	3.4	7.5	6.7	6.9
N-pään harjavirta [Arms]	2.8	2.3	2.7	2.6	5.6	3.2	7.6	6.9	7.1
D- pään harjavirta [Arms]	2.8	2.3	2.7	2.6	5.6	3.2	7.7	7.0	7.2
Akselivirran piikki [A]	23.2	23.2	22.8	21.2	26.0	22.0	26.8	34.0	37.6
N-pään harjavirran piikki [A]	11.6	11.6	12.4	12.8	15.6	12.4	22.8	25.6	32.0
D-pään harjavirran piikki [A]	11.6	12.0	12.0	12.8	15.2	12.4	22.8	26.4	32.8

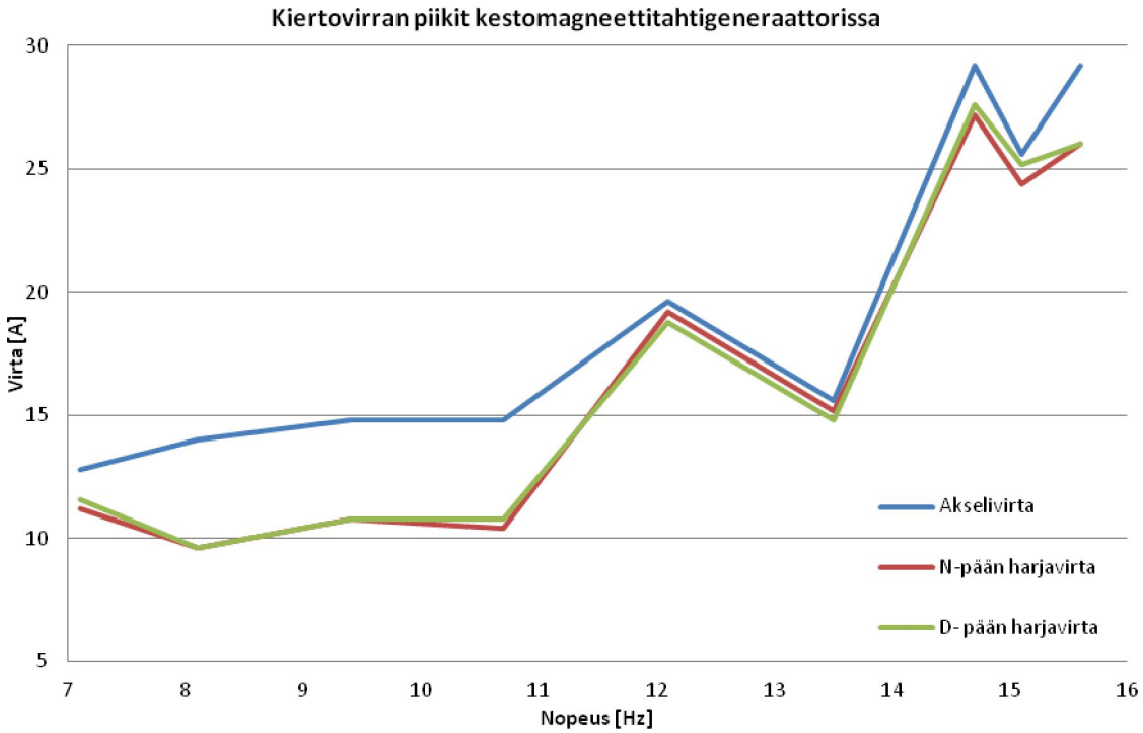
Lähtökohtaisesti kiertovirtamittaukset tehon ja nopeuden funktiona eivät kerro niinkään tehon ja nopeuden vaikutuksista kestomagneettitahtikoneen kiertovirtoihin, vaan konvertterin ohjauksen ja säädön vaikutuksista kestomagneettitahtikoneen kiertovirtoihin eri toimintapisteissä. Kiertovirtamittaukset tehon funktiona tehtiin lähinnä tämän asian todentamiseksi. Taulukon 6 15.6 Hz pisteen mittaustuloksia vertaamalla edellisen kappaleen tyhjäkäyntimittauksiin voidaan todeta tehon vaikutuksen kiertovirtoihin olevan olematon.

Kuvassa 43 on esitetty kiertovirran RMS-arvot tehon ja nopeuden funktiona. Kiertovirran RMS-arvoista havaitaan sama, mikä edellisissäkin kappaleissa; sama kiertovirta kulkee akselin ja hiiliharjojen lävitse. Kuvassa 44 on esitelty kiertovirran piikkiarvot tehon ja nopeuden funktiona. Akselivirrasta mitatut piikkiarvot ovat hieman harjavirtoja suurempia, kuten edellisissä kappaleissakin todettiin.

Kiertovirta kasvaa jonkin verran tehon ja nopeuden funtkiona, mutta tämä johtuu lähinnä konvertterin toiminnasta eri toimintapisteissä. Esimerkiksi merkittävä kiertovirran vähentyminen nopeudella 13.5 rpm voi johtua modulaattorityypin vaihtumisesta lennossa SVM#1:stä SVM#2:seen.



Kuva 43. Kiertovirran RMS-arvot nopeuden funktiona



Kuva 44. Kiertovirran piikit nopeuden funktiona

5 YHTEENVETO

Tällä hetkellä maailman tuulivoimamarkkinoita puhuttaa muun muassa tuulivoiman luotettavuus. Yksi tärkeä luotettavuustekijä on generaattoreiden laakereiden kestävyys. Laakereiden elinikää heikentävät merkittävästi tuulivoimageneraattorissa esiintyvät laakerivirrat. Yleisin syy laakerivirtoihin on konvertterin lähdön korkeataajuisessa yhteismuotoisessa jännitteessä.

Tässä työssä esiteltiin tunnettua laakerivirtateoriaa sekä tehtiin teoriaa tukevia käytännön mittauksia. Käytettyjä mittausmenetelmiä voidaan soveltaa muidenkin sähkökoneiden yhteismuotoisen- ja kiertovirran mittauksiin. Työn pääpaino oli suurten koneiden induktiivisesti kytkeytyvissä korkeataajuisissa laakerivirroissa sekä staattorin segmentoinnin tuottamissa matalataajuisissa kiertovirroissa. Sekä korkea- että matalataajuiset virrat syövyttävät laakereiden vierintäpinnat ajan myötä kelvottomiksi, ellei sähkökonetta suojata laakerivirroilta.

Työssä kerrottiin mahdollisista ratkaisuista laakerivirtojen ehkäisyyn. Paras ratkaisu sähkökoneen laakerivirtaongelmiin on keraamisten laakereiden käyttö. Näiden, niin sanottujen hybridilaakereiden korkea hinta rajoittaa kuitenkin sähkökonevalmistajien halua siirtyä niiden käyttöön. Työssä esiteltiin monia muitakin vaihtoehtoja laakerivirtojen ehkäisyyn ja esimerkiksi laakerin pesäeristyksen toimivuutta laakerivirtojen ehkäisyyn testattiin. Myös akselin maadoitukseen soveltuvia ratkaisuja testattiin ja vertailtiin.

Kun tunnetaan sähkökoneen parametrit ja asennustapa, käytettävä konvertteri ja sen toiminta, sähkökäytön toimintaolosuhteet sekä muut sähkökäyttöketjuun kiinnitetyt laitteet voidaan laakerivirtojen luonnetta ja vaarallisuutta kartoittaa. Tärkeää varsinkin suurissa sähkökoneissa on, että induktiivisesti kytkeytyvien korkeataajuisten kiertovirtojen reitti tulee katkaista. Usein siihen riittää eriste kiertovirran reitillä, esimerkiksi laakeripesällä. Jos akselin maadoituksella oikosuljetaan kiertovirtaeriste, toinenkin laakeri on eristettävä. Jos halutaan varmistaa, etteivät kapasitiivisesti kytkeytyvät laakerivirrat hajoita laakereita, on molempien laakereiden eristäminen suotavaa. Eristepinnoitettujen laakereiden käyttöön tulee suhtautua varauksella sovelluskohtaisesti.

Vaikka työssä perehdyttiin laakerivirtailmiöihin ainoastaan sähkökoneen näkökulmasta, on hyvä muistaa, että konvertterin sähkökoneelle aiheuttamat yhteismuotoiset virta- ja jänniteilmiöt voivat aiheuttaa ongelmia muuallakin sähkökäyttöketjussa, esimerkiksi vaihteistossa. Jos sähkökoneen runko on galvaanisessa kontaktissa jonkin muun toimilaitteen kanssa, voi yhteismuotoinen virta kulkea konvertterimaadoituksen sijaan toimilaitteen runkoon nostaen tämän potentiaalia. Potentiaalierot johtavassa ympäristössä voivat aiheuttaa haitallisia kiertovirtoja koko järjestelmään.

Kun kiertävien laakerivirtojen kulku koneen laakereiden läpi ehkäistään, voivat virrat kulkea akselia pitkin muihin toimilaitteisiin. Hybridilaakerit sähkökoneessa estävät kyllä kiertovirran kulun sen laakereiden lävitse, mutta samalla siirtävät kiertovirtaongelman muualle sähkökäyttöketjuun.

LÄHDELUETTELO

[1] Pyrhönen, J. 2010-11. Electrical Drives: Lecture Notes.

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

[3] Oh, H.W & Willwerth, A. 2008. Shaft Grounding – A Solution to Motor Bearing Currents. ASHRAE Transactions, vol. 114, part 2, 2008, pp 246-251.

[4] Muetze, A. 2004. Bearing Currents in Inverter-Fed AC-Motors. Väitöskirja. Darmstadin yliopisto, sähkö- ja informaatiotekniikan osasto.

[5] Muetze, A. Bearing current report for the Switch Drive Systems, 22nd November 2009.

[6] IEC. 2006. IEC Technical Specification 60034-17 fourth edition, Rotating electrical machines – Part 17: Cage induction motors when fed from converters – Application guide, 2006-05, chapters 10-11.

[7] ABB. 2000. Tekninen opas nro 5. Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä.

[8] OEM. Guidelines for the Installation of Frequency Converter Driven Machines.

[9] Alger, P.L. & Samson, H.W. 1924. Shaft Currents in Electric Machines. Alger and Samson: Shaft Currents. February 1924, pp 235-245.

[10] Prashad, H. 2002. Diagnosis of Rolling-Element Bearings Failure by Localized Electrical Current Between Track Surfaces of Races and Rolling-Elements. Transactions of the ASME, vol. 124, July 2002, pp 468-473.

[11] Muetze, A. & Binder, A. 2007. Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC Motors up to 500 kW. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, NO. 3, June 2007, pp 1614-1622.

[12] Prashad, H. 1999. Determination of magnetic flux density on the surfaces of rolling-element bearings as an indication of the current that passed through them – an investigation. Elsevier Science, Tribology International 32, Received 6 May 1999; accepted 13 October 1999, pp 455-467.

[13] PSK Standardointi. 2001. PSK 7708 standardi. Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Akselijännitteen ja -virran mittaus. 11. heinäkuuta 2011.

[14] Muetze, A. et al. 2006. What can bearings bear? *IEEE Industry Applications Magazine*, Nov/Dec 2006, pp 57-64.

[15] Binder, A. & Muetze, A. 2008. Scaling Effects of Inverter-Induced Bearing Currents in AC Machines. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, NO. 3, May/June 2008, pp 769-776.

[16] Bell, S. et al. 2001. Experience with Variable-Frequency Drives and Motor Bearing Reliability. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, NO. 5, September/October 2001, pp 1438-1446.

[17] Muetze, A. 2010. On a New Type of Inverter-Induced Bearing Current in Large Drives with One Journal Bearing. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 46, NO. 1, January/February 2010, pp 240-248.

[18] Busse, D. et al. 1997. System Electrical Parameters and Their Effects on Bearing Currents. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, NO. 2, March/April 1997, pp 577-584.

[19] Muetze, A. & Binder, A. 2007. Calculation of Motor Capacitances for Prediction of the Voltage Across the Bearings in Machines of Inverter-Based Drive Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, NO. 3, May/June 2007, pp 665-672.

[20] Muetze, A. & Binder, A. 2007. Techniques for Measurement of Parameters Related to Inverter-Induced Bearing Currents. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, NO. 5, September/October 2007, pp 1274-1283.

[21] Muetze, A. & Binder, A. 2007. Calculation of Circulating Bearing Currents in Machines of Inverter-Based Drive Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, NO. 2, April 2007, pp 932-938.

[22] Muetze, A. & Binder, A. 2005. Systematic approach to bearing current evaluation in variable speed drive systems. European Transactions on Electrical Power; 15:217-227. John Wiley & Sons, Ltd.

[23] Sharke, P. 2000. Current Jam. Mechanical Engineering, The American Society of Mechanical Engineers. May 2000, Vol. 122, No. 5.

[24] SKF. 2001. Preventing of electric erosion in bearings. *Evolution – the business and technology magazine from SKF (www.skf.com)*, 15 May 2001 #2/01.

[25] Adler, R.H. 2003. Machine Design – Damaging affects of shaft currents. Reliability Engineering Snapshot. January 2003.

[26] Doyle F. Busse et al. 1997. An Evaluation of the Electrostatic Shielded Induction Motor: A Solution for Rotor Shaft Voltage Builup and Bearing Current. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, NO. 6, November/December 1997, pp 1563-1570.

[27] Muetze, A. & Binder, A. 2006. Don't Lose Your Bearings: Mitigation techniques for bearing currents in inverter-supplied drive systems. *IEEE Industry Applications Magazine*, July/Aug 2006, pp 22-31.

[28] ABB. 1999. ABB Fact File DM1: Bearing currents in modern drive systems.

[29] Walker, J.H. 1981. Large Synchronous Machines: Design, Manifacture and Operation.

[30] Schaeffler Group Industrial. 2011. Current-Insulating Bearings: Rolling bearings for prevention of damage due to current passage. FAG.

[31] Oh, H.W. 2006. Protecting AC Motors From Destructive Shaft Currents. Electro Static Technologyn General Managerin kirjoitus NASATech sivustolla. Saatavilla http://nasatech.com/motion/features/feat1_0208.html

[32] CHO-LUBE® 4220 Conductive Grease datalehti. Saatavilla http://www.chomerics.com/products/documents/cholube.pdf

[33] NSK. 1998. Insulated Bearings for Traction Motors. Motion & Control, No 5, pp 44-46.

[34] Muetze, A. & Binder, A. 2006. Calculation of Influence of Insulated Bearings and Insulated Inner Bearing Seats on Circulating Bearing Currents in Machines of Inverter-Based Drive Systems. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, NO. 4, July/August 2006, pp 965-972.

[35] Muetze, A. & Oh, H.W. 2008. Application of Static Charge Dissipation to Mitigate Electric Discharge Bearing Currents. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, NO. 1, January/February 2008, pp 135-143.

[36] Sohre Turbomachinery. Saatavilla http://www.sohreturbo.com/grounding-brushes/type-lw-photo.php?photo_name=lw10001.jpg

[37] Mäki-Ontto, P. & Luomi, J. 2003. Bearing current prevention of converter-fed AC machines with a conductive shielding in stator slots. Electric Machines and Drives Conference, 2003, IEMDC'03, IEEE International, pp 274-278

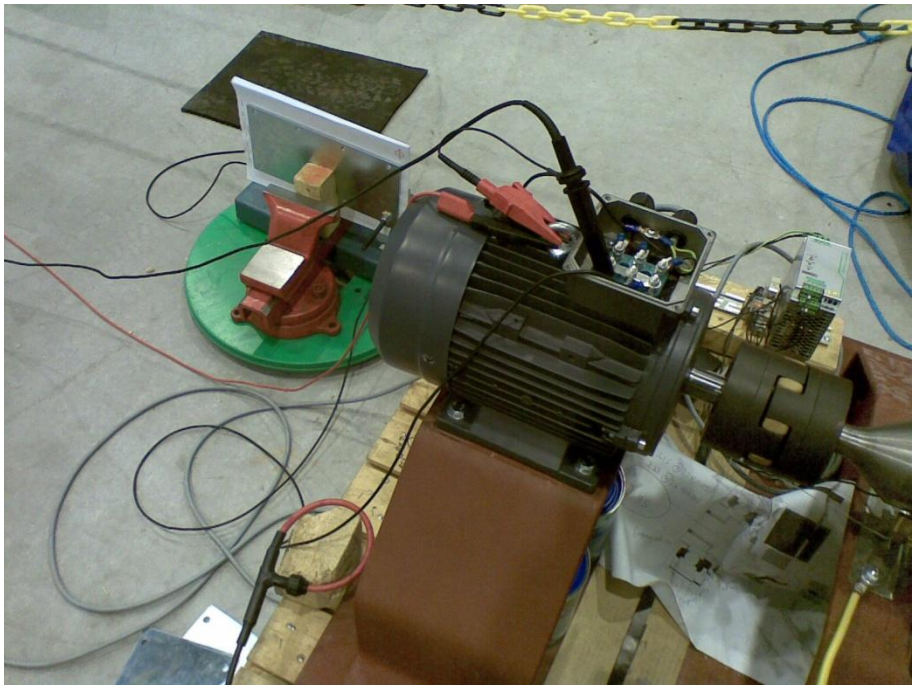
[38] Vacon. 2007. User's manual. Active Front End (AFE) application.

[39] Dall, D. et al. 2008. Gear Up Your Bearings: A field case study on bearing damage in low-voltage ac induction motors. *IEEE Industry Applications Magazine*, July/Aug 2008, pp 45-53.

LIITTEET

LIITE 1. LEVYKAPASITANSSIN MITTAUSJÄRJESTELYT

Rakennetun levykondensaattorin läpi kulkevan virran mittausjärjestelyt. Kondensaattorin eristeenä toimii paperi. Levykondensaattorille menevä virtajohdin on aseteltu tarkasti keskelle Rogowski-virranmittauslenkkiä (alempi kuva).



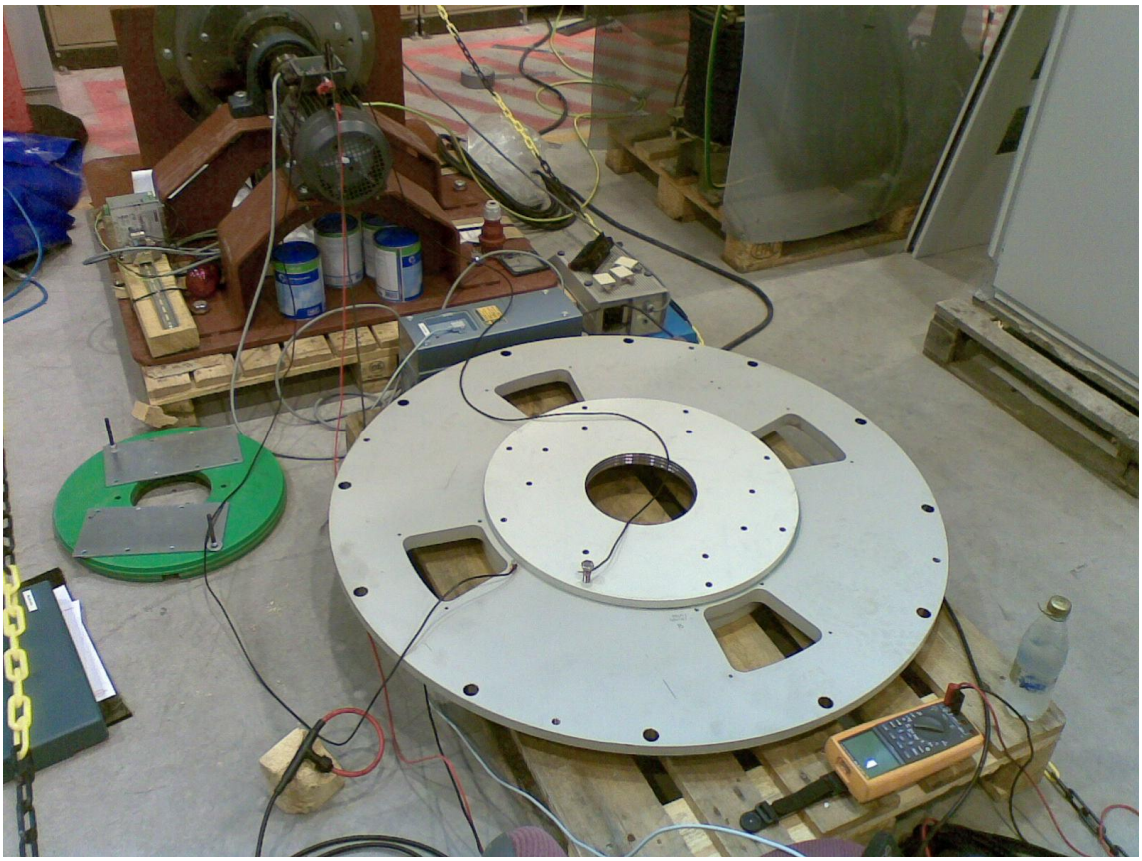
LIITE 2. KÄYTETYT MITTALAITTEET

Diplomityön mittauksissa käytetyt mittalaitteet

Mittalaite	Valmistaja	Malli	Taajuuskaista	Muuta
Oskilloskooppi	Tektronix	TDS3014C	100 MHz	-
Jännitemittapää	Tektronix	P5100A	500 MHz	2.5 kV piikkiarvo
Virranmittauslenkki	PEM	CWT075xB	1770 Hz - 15 MHz	150 A piikkiarvo
Yleismittari	Fluke	289	-	tarkkuus 1 %
Mikro-ohmimittari	Sefelec	MGR10	-	tarkkuus 0.03 %

LIITE 3. PESÄERISTEEN MITTAUKSET

Alla olevassa taulukossa on esitetty kappaleen 4.1.1 kapasitanssien laskuissa käytettyjä arvoja.

Eristepaksuus [mm]	0.8	1.0	1.5	2.2	2.4	3.2	5.3	6.3	7.5	8.5
Levykapasitanssin ala [m²]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Eristeen suht. permittiivisyys	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9	4.9
Teoreettinen kapasitanssi [nF]	4.3	3.4	2.2	1.46	1.34	1.03	0.62	0.52	0.43	0.38
Yleismittarilla mitattu kapasitanssi [nF]	2.7	2.5	1.9	1.42	1.36	1.12	0.84	0.73	0.65	0.60
Min. jännite [V]	-120.0	-100.0	-572.0	-120.0	-80.0	80.0	148.0	-136.0	-332.0	-140.0
Max. jännite [V]	452.0	516.0	240.0	492.0	548.0	-520.0	-462.0	108.0	128.0	480.0
dU pk-pk [V]	572.0	616.0	812.0	612.0	628.0	-600.0	-610.0	244.0	460.0	620.0
10 % dU pk-pk + min. jännite [V]	-64.0	-40.0	-490.8	-60.0	-16.0	20.0	88.0	-112.0	-284.0	-80.0
90 % dU pk-pk + min. jännite [V]	396.0	456.0	158.8	432.0	484.0	-460.0	-400.0	84.0	80.0	420.0
dU [V]	460.0	496.0	649.6	492.0	500.0	-480.0	-488.0	196.0	364.0	500.0
t_10% [µs]	29.0	28.5	13.9	29.8	183.3	0.8	0.7	37.0	20.5	29.6
t_90% [µs]	17.3	16.8	8.1	20.1	172.8	9.2	8.7	27.9	11.9	19.9
dt [µs]	11.7	11.7	22.0	9.7	10.5	8.3	9.4	9.1	8.6	9.7
dU/dt [V/µs]	39.3	42.4	29.5	50.6	47.5	57.6	52.0	21.5	42.3	51.6
Virran huippu [A]	0.11	0.12	0.05	0.06	0.05	0.05	0.03	0.02	0.02	0.01
Mittauksista laskettu kapasitanssi [nF]	2.80	2.83	1.69	1.19	0.95	0.87	0.58	0.70	0.47	0.27

Käytännön mittausjärjestelyt sähkökoneen pääty- ja takakilven sekä eristeen muodostaman kapasitanssin mittauksista hahmottuvat alla olevasta kuvasta. Toinen kilpi on yhdistetty moottorin PE-pisteeseen ja toinen käämien ulkoiseen tähtipisteeseen. Virranmittauslenkki vasemmassa alakulmassa mittaa kilpien välistä kulkevaa vuotovirtaa.