



LAAKERIVIRTOJEN MITTAAMINEN PUMPPUKÄYTISSÄ

Juha Väisänen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2014
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

VÄISÄNEN, JUHA:

Laakerivirtojen mittaaminen pumppukäytöissä

Opinnäytetyö 43 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Toukokuu 2014

Taajuusmuuttajalla ohjatuissa pumppukäytöissä on havaittu laakerivirtavikoja. Jos laakerivirtavikaa on epäilty, on se voitu todeta ainoastaan purkamalla moottori ja halkaisemalla laakeri. Tässä opinnäytetyössä etsittiin kenttäolosuhteisiin soveltuvaa menetelmää laakerivirtojen mittaamiseksi. Työn toimeksiantajana oli pumppuvalmistaja Kolmeks Oy.

Pumppukäytöissä laakerivirrat ovat ns. akselinmaadoitusvirtaa, jossa moottorin akseli toimii virrallisenä johtimena. Laakerivirrat ovat hyvin pulssimaisia. Näin ollen moottorin akselin ympärille syntyy muuttuva magneettikenttä laakerivirtojen seurauksena. Muuttuvaa magneettikenttää on mahdollista tutkia mittakelan avulla. Tässä työssä keuhittiin kolmea erilaista kelaa ja perehdyttiin hieman muihin mahdollisiin mittaussmenetelmiin.

Työssä tehtyjen tutkimusten perusteella löytyi sopiva mittalaite, jolla laakerivirrat voidaan havaita helposti ja jota voidaan käyttää kenttäolosuhteissa. Jatkossa mittalaite on tarkoitus antaa huoltomiehen mukaan, joka voi nopeasti tarkistaa onko huollettavassa koneessa laakerivirtaongelmia.

Asiasanat: laakerivirta, akselivirta, taajuusmuuttajakäyttö, akselijännite

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electric Power Engineering

VÄISÄNEN, JUHA:
Measurement of Bearing Currents in Pump Uses

Bachelor's thesis 43 pages, appendices 4 pages
May 2014

Bearing currents may appear in pumps driven by frequency converters. Failure in bearing is hard to prove and usually the bearing is split to two pieces. The purpose of this thesis was to find a solution how to measure bearing currents in the field. The client of this thesis was a Finnish pump and motor manufacturer Kolmeks Ltd.

In pump uses bearing currents are so-called shaft grounding currents, where the shaft of the motor is the current-carrying conductor. The bearing currents are pulses which cause variable magnetic field around the motor shaft. It is possible to investigate the variable magnetic field with a measuring coil. In this thesis three different coils were tested and other possible measuring methods were studied.

A measuring device that observes bearing currents was found. It is also easy to use and fits well to the field. In the future the device will be given to the company's serviceman, who can quickly check if there are problems with bearing currents in the serviceable machine.

Key words: bearing current, shaft current, use of a frequency converter, shaft voltage

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	LAAKERIVIRRAT.....	7
2.1	Laakerivirtojen muodostuminen.....	7
2.2	Laakerivirtatyypit.....	11
2.3	Laakerivirroilta välttyminen.....	13
2.4	Yleistä laakerivirtojen mittaamisesta.....	14
2.5	Akselinmaadoitusvirran ja kiertävän virran mittaaminen.....	16
2.6	Akseli- ja laakerijännitteen mittaaminen.....	18
3	TESTATUT MITTAUSMENETELMÄT.....	20
3.1	Testaaminen mittauskelalla.....	20
3.2	Testaaminen LEM flex -virta-anturilla.....	23
3.3	Testaaminen PEM CWT1 -Rogowskin kelalla.....	28
4	MUITA MAHDOLLISIA MITTAUSMENETELMIÄ.....	33
4.1	Radiotekniikan perustuva mittausmenetelmä.....	33
4.2	Mittaaminen Fluke 190 Series II ScopeMeter -oskilloskoopilla.....	35
5	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	37
	LÄHTEET.....	38
	LIITTEET.....	40
	Liite 1. Akselinmaadoitusvirran mittausperiaate.....	40
	Liite 2. LEM Flex -sarjan virta-antureiden tiedot.....	41
	Liite 3. PEM CWT -sarjan tiedot.....	43

LYHENTEET JA TERMIT

AC	vaihtovirta, <i>Alternating Current</i>
DC	tasavirta, <i>Direct Current</i>
dU/dt	jännitteen muutosnopeus, V/s
GTO	tyristori tyyppi, <i>Gate Turn-Off thyristor</i>
EDM	kipinätyöstö, <i>Electrical Discharge Machining</i>
f	taajuus, Hz
I_c	kondensaattorin virta, A
IGBT	transistori tyyppi, <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
PE	suojaamaa, <i>Protective Earth</i>
PWM	pulssinleveysmodulaatio, <i>Pulse-Width Modulation</i>
RMS	tehollisarvo, <i>Root Mean Square</i>
t	jaksonaika, s
TAMU	taajuusmuuttaja
UHF	taajuusalue 0,3 – 3GHz, <i>Ultra High Frequency</i>

1 JOHDANTO

Sähkömoottoreita käytetään nykyään hyvin usein taajuusmuuttajan kanssa mm. ilmastointi-, tuuletus-, lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä. Taajuusmuuttajalla saadaan säädettyä moottorin pyörimisnopeutta portaattomasti. Lisäksi taajuusmuuttajakäytöissä säästetään energiakuluissa ja moottorin melutaso pysyy siedettävänä. Taajuusmuuttajakäyttöjen kehitys nopeammaksi aiheuttaa kuitenkin enemmän räsitusta niiden ohjaamille sähkökoneille. Yhtenä ongelmana ovat laakerivirrat. Korkeat kytkentätaajuudet ja nopeasti nousevat jännitepulssit taajuusmuuttajalla voivat muodostaa virtapulsseja, jotka purkautuvat moottorin laakereiden kautta. Näitä purkauksia kutsutaan laakerivirroiksi. Ajan kuluessa laakerivirrat aiheuttavat laakerivaurioita, jotka lopulta johtavat moottorin meluisaan käyntiin. Joissakin tapauksissa laakerivirtojen aiheuttamia laakerivaurioita on havaittu jo muutaman kuukauden käytön jälkeen. (ABB 2000, Fläkt Woods 2007, Kolmeks 2013)

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on etsiä kenttäolosuhteisiin soveltuva menetelmä laakerivirtojen mittaamiseen pumppuvalmistaja Kolmeks Oy:lle. Pumppuja pyörittävät sähkömoottorit ovat usein ahtaissa ja hankalissa tiloissa. Tämä tuo oman lisähaasteensa laakerivirtojen mittaamiseen pumppukäytöissä.

Kolmeks Oy on Brandt Group konserniin kuuluva suomalainen pumppuvalmistaja. Sen tuotantoon kuuluu pumppujen lisäksi sähkömoottorit ja LVI-myynti. Kolmeks on erikoistunut lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmissä käytettäviin keskipakopumppuihin. (Kolmeks 2014)

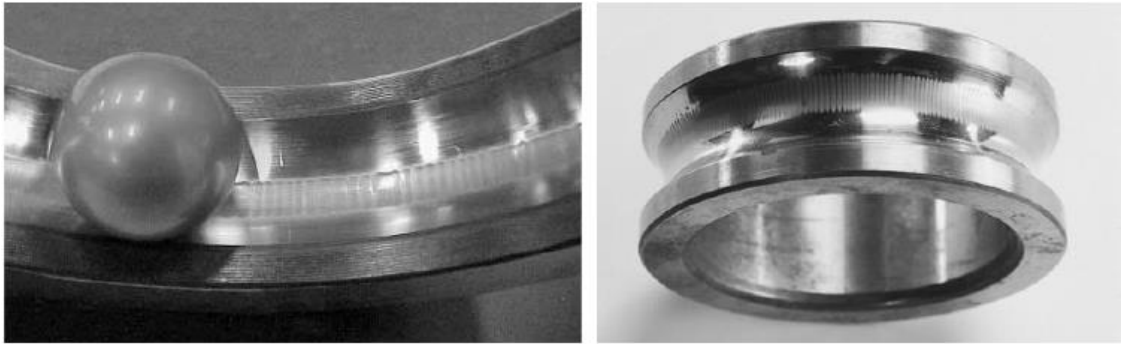
2 LAAKERIVIRRAT

2.1 Laakerivirtojen muodostuminen

Laakerivirtoja on esiintynyt oikosulkumoottorien alkuaajoista asti. Ensimmäisissä moottoreissa laakerivirtoja aiheutti koneen magneettinen epäsymmetria, kuten vaihekäämien väliset erot tai koneen epäkeskeisyys. Tällöin koneen staattoriin jää kiertämään syöttötaajuinen jäännösvuo, joka puolestaan indusoi akselin päiden välille jännitteen. Tätä jännitettä kutsutaan akselijännitteeksi. Jos indusoitunut jännite on tarpeeksi suuri, alkaa syöttötaajuinen virta kulkea akselin, laakereiden ja koneen rungon muodostamassa virtapiirissä. (PSK Standardisointi 2004)

Nykyaikaisten moottoreiden suunnittelu- ja valmistustavat ovat minimoineet moottorin epäsymmetrian aiheuttamat pienitaajuiset laakerivirrät. Sen sijaan uusissa vaihtovirtakäytöissä tehoasteiden nopea kytkentä IGBT-transistoreilla voi aiheuttaa suurtaajuisia yhteismuotoisia virtapulsseja, jotka purkautuvat laakerien kautta kipinöimällä. Kun pulssilla on tarpeeksi energiaa, metallia siirtyy kuulalaakerista ja vierintäpinnasta voiteluaineeseen. Ilmiötä kutsutaan kipinätyöstöksi (EDM, *Electrical Discharge Machining*). Pienikin kipinätyöstön aiheuttama poikkeama kerää uusia pulsseja ja muodostaa lopulta kipinätyöstökuopan. Koska kytkentätaajuudet ovat nykyaikaisissa vaihtovirtakäytöissä korkeita, muodostuu virtapulsseja suuri määrä. Tämän takia laakeri voi kulua hyvinkin nopeasti. (ABB 2000, Kolmeks 2013)

Kipinöinnin aiheuttamat muodonmuutokset näkyvät ns. pyykkilauta-kuviona laakerin vierintäpinnoilla (kuva 1). Laakereiden kulumisen puolestaan aiheuttaa moottorin me-luisaa käyntiä, kasvattaa virrankulutusta, kuumentaa moottoria ja pahimmassa tapauksessa voi jopa aiheuttaa moottorin kiinni leikkaamisen. (Fläkt Woods 2007)



Kuva 1. Laakerivirtojen seurauksena vaurioituneita laakereita (ABB 2000, Ahola 2011)

Sähkötekniseltä rakenteeltaan laakeri vastaa kahden kondensaattorin sarjaan kytkentää. Tätä on havainnollistettu kuvassa 2. (Erdman ym. 1995)



Kuva 2. Laakerin sähkötekniinen rakenne (Directindustry 2014, kuvaa muokattu)

Kondensaattorin levyjen varaus muuttuu sen ollessa kytkettynä vaihtojännitteeseen. Kun kondensaattori latautuu tai purkautuu, kulkee siinä kaavan 1 mukainen virta I_c .

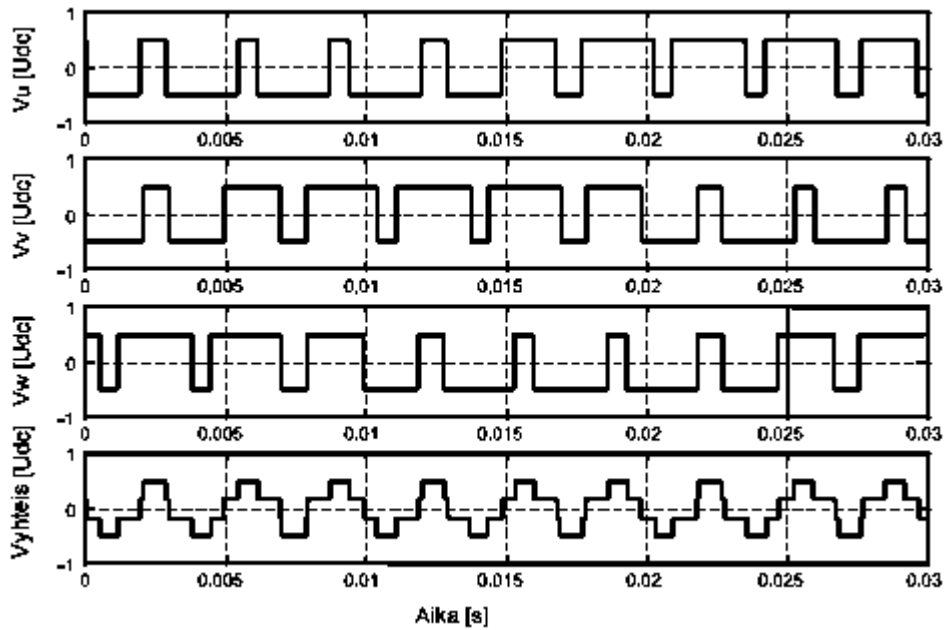
$$I_c = C \frac{dU}{dt} \quad (1)$$

,missä C on kondensaattorin kapasitanssi [F]
 dU/dt on jännitteen muutosnopeus [V/s]

Laakerivirrat ovat verrattavissa kondensaattorin virtaan. Kaavan 1 mukaisesti laakerivirtojen suuruus kasvaa kytkentäajan lyhentyessä. Nykyaikaisilla IGBT-vaihtosuuntaajilla jännitepulssin ohjaaminen tapahtuu huomattavasti lyhyemmässä ajassa kuin aiemmin käytetyillä GTO-vaihtosuuntaajilla. Tämän takia laakerivirrat ovat nykyään voimakkaampia kuin ennen ja niiden aiheuttamia ongelmia havaitaan useammin. (ABB 2000, Erdman ym. 1995)

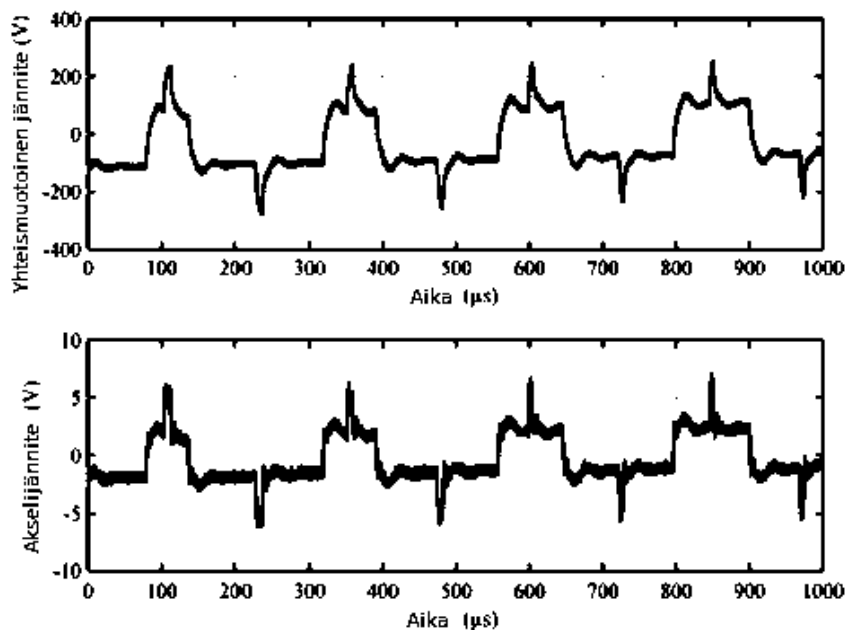
Laakerin öljykalvon paksuus on n. $0,2 - 20\mu\text{m}$ ja läpilyöntikestoisuus $1 - 30 \text{ V}/\mu\text{m}$. Laakerivirtoja muodostuu, kun moottorin rungon ja roottorin välille syntyy tarpeeksi suuri potentiaaliero ja laakeriöljyn läpilyöntikestoisuus ylittyy. Tällöin muodostuu lyhytkestoinen, alle 100ns kestävä virtapulssi, joka purkaa muodostuneen energiavaraston. Virtapulssi kulkee kipinöimällä pienellä alalla, jolloin sillä on suuri virrantiheys. Tällöin laakeripinnalta sulaa pieniä teräspalasia laakeriöljyn sekaan. Muodostuneet epätasaisuudet alkavat kertautua muodostaen jo käsiteltyjä pyykkilautakuvioita. (Ahola 2011, Fläkt Woods 2007)

Täysin symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä jännitteiden vektorisumma on aina nol-la. Kun laitetta käytetään PWM-taajuusmuuttajalla, tasajännitteestä tuotetaan kolmi-vaiheinen jännite. Tuotettu jännite ei kuitenkaan ole symmetristä, jolloin myös jännitteiden vektorisumma poikkeaa nolasta. Tällaista jännitettä kutsutaan yhteismuotoiseksi jännitteeksi ja se voidaan mitata minkä tahansa kuorman nolapistestä, kuten moottorin käämityksen tähtipisteestä. Yhteismuotoisen jännitteen taajuus on sama kuin taajuusmuuttajan kytkentätaajuus ja sen suuruus on verrannollinen tasajännitevälipiirin jännitteeseen. Suuritaajuisia laakerivirtoja muodostuu, kun yhteismuotoinen jännite purkautuu vuotovirtoina vaihtovirtakäyttöjen yhteismuotoiseen virtapiiriin. Yhteismuotoisen jännitteen muodostumista pulssileveysmoduloidun teholähteen vaihejännitteistä on havainnollistettu kuvassa 3. (ABB 2000)



Kuva 3. Yhteismuotoinen jännite kolmivaiheisessa PWM-syötössä (ABB 2000)

Indusoitua akselijännite on riippuvainen moottorin rakenteesta. Akselijännite voi olla syöttötaajuinen vaihtojännite, tasajännite, suurtaajuinen jännitepulssi tai näiden yhdistelmä. Yleensä se on n. 2 – 10 % yhteismuotoisesta jännitteestä. Kuvassa 4 on esitettyä 15kW induktiomootorille, jonka nimellisjännite on 400 V, mitattu yhteismuotoinen jännite ja akselijännite. (Ahola 2011, Mikkonen 2009)



Kuva 4. 15kW moottorille mitattu yhteismuotoinen jännite ja akselijännite (Ahola 2011, kuvaa muokattu)

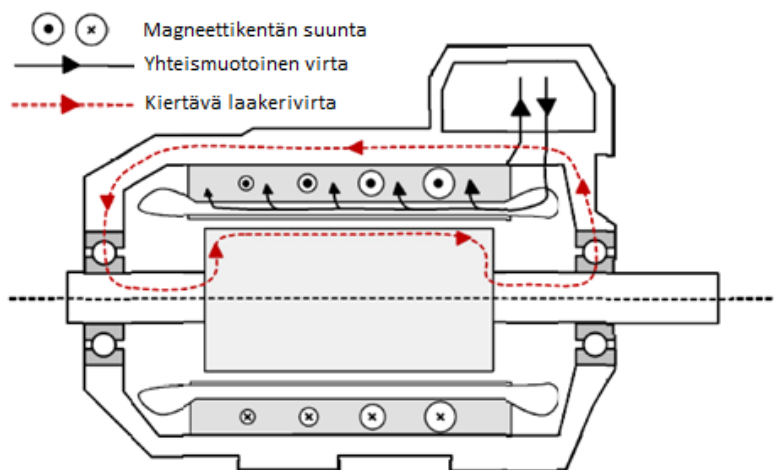
Laakerivirtojen taajuuteen f , vaikuttaa laakerivirtojen jaksonaika t kaavan 2 mukaisesti.

$$f = \frac{1}{t} \quad (2)$$

2.2 Laakerivirtatyypit

Laakerin yli indusoitunut jännite voi aiheuttaa kolmea eri laakerivirtatyyppeä: kiertävä virta, akselinmaadoitusvirta, sekä kapasitiivinen purkausvirta. Muodostumistapaan vaikuttaa moottorin koko, sekä moottorin rungon ja akselin maadoitustapa. Tasajännitevälipiirin jännite ja vaihtovirtakäytön tehokomponenttien dU/dt -arvo vaikuttavat laakerivirtojen määrään. (ABB 2000)

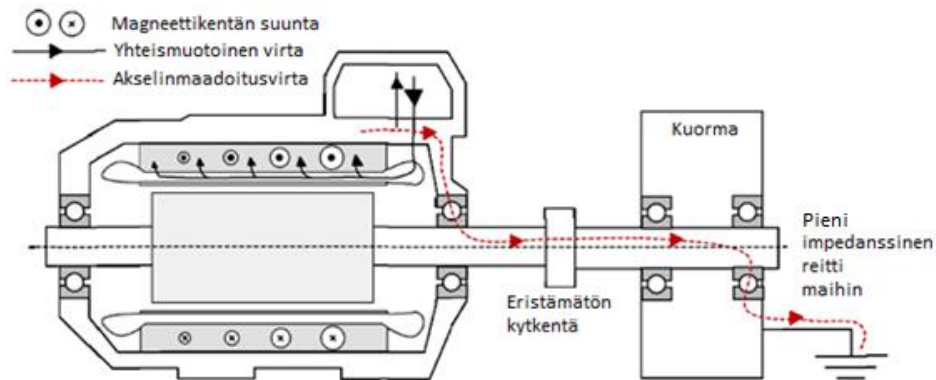
Kiertävä virta aiheutuu staattoria kiertävästä suuritaajuisesta magneettivuosta, joka on seurausta moottorin käämityksestä staattorin runkoon kulkevien kapasitiivisten vuotovirtojen epäsymmetriasta. Magneettivuo puolestaan indusoi suuritaajuisen akselijännitteen, joka tarpeeksi suurena aiheuttaa läpilyönnin laakeriöljyssä. Tällöin syntyvä suuritaajuinen kiertovirta kulkee laakereiden, akselin ja rungon muodostamassa virtapiirissä kuvan 5 mukaisesti. Alttius kiertävälle laakerivirrälle kasvaa koneen tehon kasvaessa (ABB 2000, PSK Standardisointi 2004).



Kuva 5. Kiertävän laakerivirran muodostuminen (Ahola 2011, kuvaa muokattu)

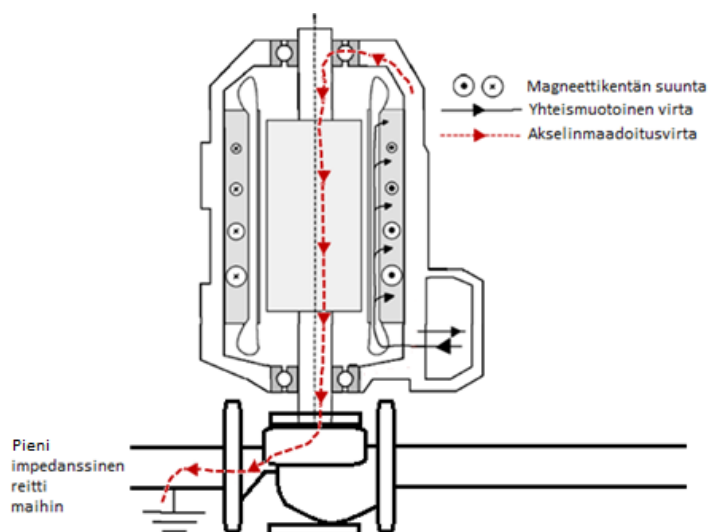
Akselinmaadoitusvirta on laakerivirta, jota esiintyy kun impedanssi reitillä roottori-maa on pienempi kuin reitillä moottorin runko-maa. Staattorilta runkoon vuotava suurita-

juinen virta nostaa moottorin rungon jännitettä palatessaan vaihtosuuntaajalle, sillä kaikki mahdolliset paluureitit sisältävät impedanssia. Tällöin lähdemaan ja moottorin rungon välille syntyy potentiaaliero. Moottorin akselin ollessa maadoitettuna, moottorin rungon jännitteen kasvu näkyy laakereissa. Jos jännite on tarpeeksi suuri, tapahtuu öljyssä läpilyönti. Tällöin syntyy akselinmaadoitusvirta, joka kulkee moottorin rungosta laakerin, akselin ja käytettävän laitteen kautta takaisin vaihtosuuntaajaan kuvan 6 mukaisesti. (ABB 2000, Ahola 2011)



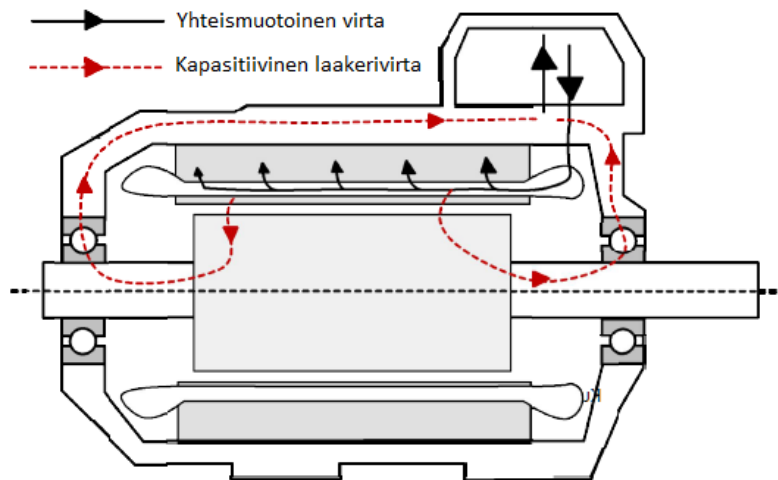
Kuva 6. Akselinmaadoitusvirran muodostuminen (Ahola 2011, kuvaa muokattu)

Pumppukäytöissä laakerivirrat kulkevat tyypillisesti moottorin rungosta takalaakerin kautta akselille. Akselilta laakerivirta siirtyy pumpattavan nesteeseen ja putkiston kautta maihin. Pumppukäytöissä laakerivirrat eivät tyypillisesti kulje etulaakerin kautta, koska moottorin etupään laakerin ulkokooli on koneistettujen pintojen kautta hyvin maadoitettu. Kuvassa 7 on esitetty laakerivirran kulkureitti pumppukäytöissä. (Kolmeks 2013)



Kuva 7. Akselinmaadoitusvirta pumppukäytössä (Ahola 2011, kuvaa muokattu)

Kapasitiiviset purkausvirrat ovat laakerivirtoja, jotka syntyvät kun ilmvälikapasitanssin sähkökenttään varautunut energia purkautuu laakerin tai laakerien läpi. Esimerkiksi staattorin ja roottorin väliseen ilmväliin voi muodostua sähkökenttä staattisen sähkövarauksen siirtyessä vesihöyryn välityksellä. Pienillä moottoreilla, joita ei ole maadoitettu käytettävän laitteen kautta voi esiintyä kapasitiivista purkausvirtaa. Tämän aiheuttaa yhteismuotoisen jännitteen sisäinen jännitejakauma moottorin sisäisissä hajakapasitansseissa. Kuvassa 8 on esitettyä kapasitiivisten laakerivirtojen muodostuminen. (ABB 2000, PSK Standardisointi 2004)

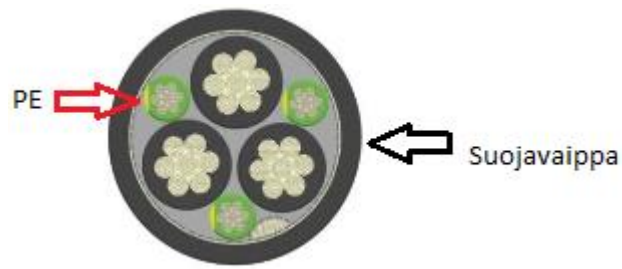


Kuva 8. Kapasitiivisen purkausvirran muodostuminen (Ahola 2011, kuvaa muokattu)

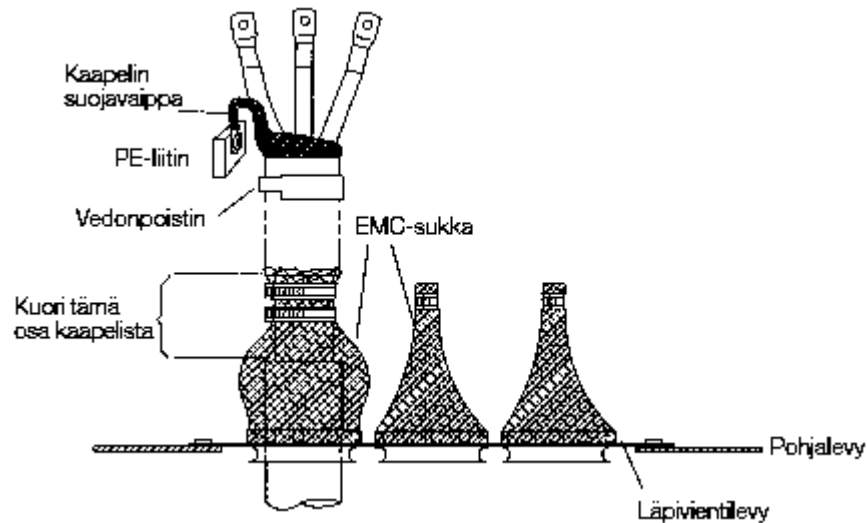
2.3 Laakerivirroilta välttyminen

Laakerivirtojen vähentämiseen on kehitetty erilaisia menetelmiä. Niissä on tavoitteena alentaa laakerijännite niin pieneksi, että suuritaajuisia laakerivirtapulsseja ei indusoidu tai ne ovat merkityksettömän pieniä. Laakerivirtoihin voidaan vaikuttaa oikealla kaapelointi- ja maadoitusjärjestelmällä, laakerivirtapiirien katkaisulla ja suuritaajuisen yhteismuotoisen virran vaimentamisella. (ABB 2000)

Tehokas menetelmä laakerivirtojen ehkäisemiseksi on oikeanlaisen maadoitusjärjestelmän luominen, jossa moottorin rungon ja vaihtosuuntaajan välillä on mahdollisimman pieni impedanssinen kytkentä. Tällainen saadaan käyttämällä symmetrisiä, suojattuja moottorikaapeleita (kuva 9), joissa myös PE-johdin on symmetrinen. Kaapelin suojavaipan tulee olla jatkuva ja hyvin johtavasta materiaalista valmistettu. Lisäksi taajuusmuuttaja ja moottori tulee liittää 360° liittöksillä (kuva 10). (ABB 200, Kolmeks 2013)



Kuva 9. TAMU-käyttöön suositeltu moottorikaapeli (Lutze 2014, kuvaa muokattu)



Kuva 10. 360° liitos (ABB 2000)

Suuremman kokoluokan koneissa laakerivirtojen reitti saatetaan katkaista käyttämällä eristettyjä laakereita. Moottorin ja työkoneen välillä on mahdollista käyttää eristettyä kytkintä. (Ahola 2011, Mikkonen 2009)

2.4 Yleistä laakerivirtojen mittaamisesta

Koska sähkökoneen laakerit ovat rungon sisällä, laakerivirtojen mittaaminen suoraan vakiomoottorista on mahdotonta. Tämän takia on kehitelty erilaisia kenttäkäyttöön soveltuvia mittauksia, joilla laakerivirtoja voidaan mitata epäsuorasti esimerkiksi moottorin pyörivältä akselilta. Näitä mittauksia varten tarvitaan kuitenkin erikoislaitteita ja asiantuntevaa henkilöstöä. Mittalaitteiston taajuusalueen tulee olla vähintään 10 kHz – 2 MHz laakerivirtojen suurista taajuuksista johtuen. Lisäksi mittalaitteistolla tulee havaita

vähintään 150 – 200 A:n suuruiset huippuarvot ja toisaalta mA:n suuruiset tehollisarvot. (ABB 2000)

Laakerivirtamittauksissa tutkittavan koneen tulee pyöriä vähintään 10 % nimellisnopeudestaan, jolloin laakerit nousevat öljykalvolle. Tätä pienemmillä nopeuksilla laakerin kuulilla ja laakeriuralla on metallinen kontakti ja mittaukset saattavat näyttää suuria virtoja. Laakerin kannalta tämä ei kuitenkaan ole haitallista, sillä kontaktipinta on suuri ja kuluttavaa kipinöintiä ei synny. (ABB 2000, PSK Standardisointi 2004)

Akselinmaadoitusvirta tapauksessa laakerivirran suuruus saadaan selville mittamaalla akselinmaadoitusvirran suuruus. Kiertävä virta mitataan oikosulkemalla moottorin runko ja akseli. Laakerivirtojen suuruutta voidaan arvioida myös mittaamalla akseli- ja laakerijännitettä. Lisäksi laakerikipinöintiä voidaan tutkia radiotekniikkaan perustuvalla mittausmenetelmällä. (Ahola 2011, PSK Standardisointi 2004)

Taulukoissa 1 ja 2 on esitettyinä laakerivirtojen toteamiseksi tehtävät mittaukset. Suoritettavaan mittaukseen vaikuttaa koneen nimellinen teho ja asennustapa. Jos moottorin ja työkoneen välinen kytkentä on eristetty eikä akselia ole erikseen maadoitettu, kyseessä on kelluva akseli. Kelluvia akseleita esiintyy esimerkiksi hihnakäytöissä. Jos akseli on kytketty työkoneeseen suoraan ilman eristystä, kyseessä on johtavasti kytketty akseli. (PSK Standardisointi 2004)

TAULUKKO 1. Suoritettavat mittaukset kelluvalle akselille (PSK Standardisointi 2004)

Moottorin nimellisteho kW	≤ 30	30... 100	> 100
Kapasitiivinen jännite	X		
Indusoitunut jännite			(X)
Akselin maadoitusvirta			
Kiertovirta			X
(X) = ei voi käyttää yksin tilannearviossa			

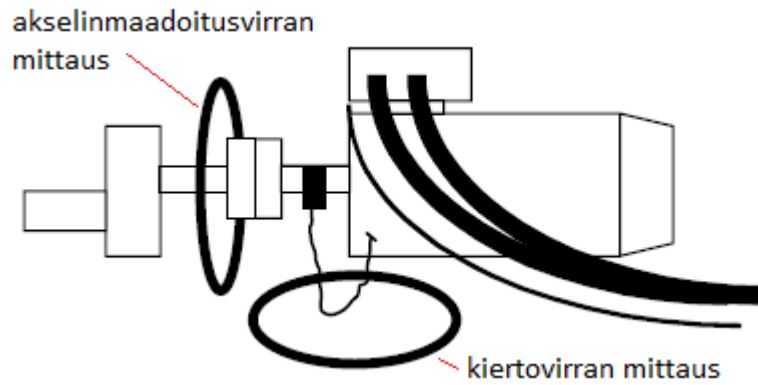
TAULUKKO 2. Suoritettavat mittaukset kytketylle akselille (PSK Standardisointi 2004)

Moottorin nimellisteho kW	≤ 30	30... 100	> 100
Kapasitiivinen jännite			
Indusoitunut jännite			(X)
Akselin maadoitusvirta	X	X	X
Kiertovirta			X
(X) = ei voi käyttää yksin tilannearviossa			

2.5 Akselinmaadoitusvirran ja kiertävän virran mittaaminen

Akselinmaadoitusvirtaa voidaan mitata akselin ympäriltä sopivalla virta-anturilla. Toinen vaihtoehto on tutkia akselin ympärille muodostuvaa magneettikenttää. Akselinmaadoitusvirta tapauksessa moottorin akseli toimii virrallisena johtimena, jolloin sen ympärille syntyy magneettikenttä. Koska virta on hyvin pulssimaista, myös sen synnyttämä magneettikenttä on muuttuva. Muuttuvaa magneettikenttää voidaan tutkia asettamalla akselin ympärille kela, jonka päistä mitataan siihen indusoitunutta jännitettä. Akselinmaadoitusvirran mittausperiaate on esitetty kuvassa 11. (Kolmeks 2013, PSK Standardisointi)

Kiertävä virta voidaan mitata oikosulkemalla kone siten, että oikosulkulenkin toinen pää kiinnitetään koneen runkoon ja toinen pää painetaan pyörivää akselia vasten. Tämän jälkeen mitataan oikosulkulenkissä kulkeva virta sopivalla virta-anturilla. Kiertävän virran mittaaminen on vaarallista, koska oikosulkulenkkiä painetaan pyörivää akselia vasten. Lisäksi akselikontaktien ylimenovastukset ja mahdolliset rinnakkaiset virtatiet tuovat mittauksiin virhemahdollisuuksia. Periaate kiertovirran mittauksesta on esitetty kuvassa 11. (PSK Standardisointi 2004)



Kuva 11. Akselinmaadoitusvirran ja kiertovirran mittaus (ABB 2000, kuvaa muokattu)

Taulukoissa 3 ja 4 on esitettyä raja-arvoja laakerivirran tehollisarvolle ja huippuarvolle.

TAULUKKO 3. Laakerivirran tehollisarvo (PSK Standardisointi 2004)

Laakerivirran tehollisarvo I_{rms}	Haitallisuusluokitus
< 20mA	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään.
20mA ... 50mA	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.
> 50mA	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään.

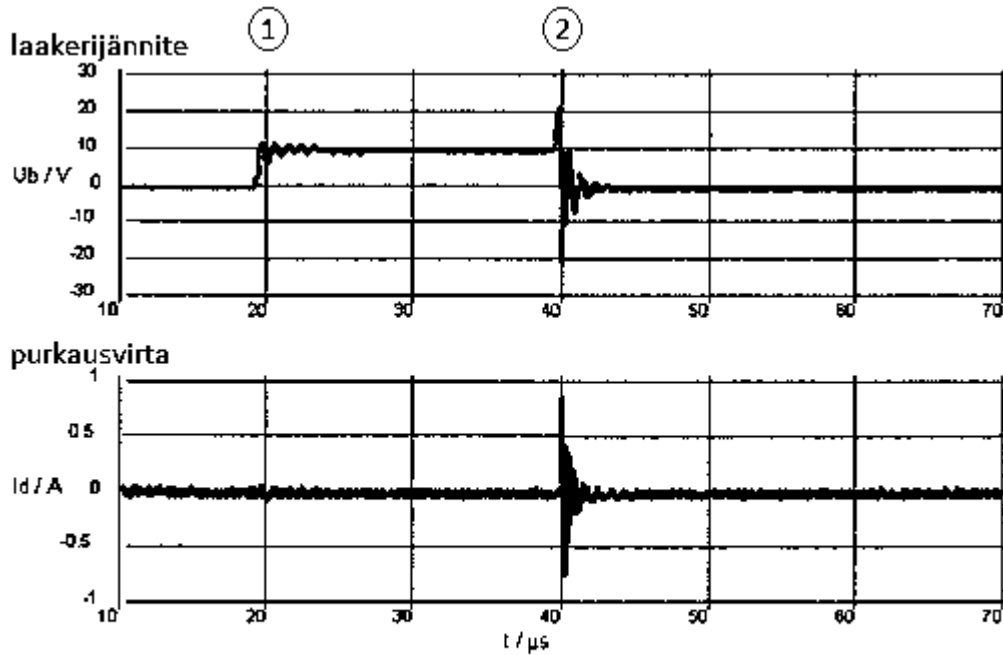
TAULUKKO 4. Laakerivirran huippuarvo (PSK Standardisointi 2004)

Laakerivirran huippuarvo I_p	Haitallisuusluokitus
< 1 A	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään.
1 A ... 2 A	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.
> 2 A	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään.

Edellä mainittujen mittausten yhteydessä tulisi mitata taajuusmuuttajan moottorilähdön PE-johtimen virta ja summavirta moottorin syöttökaapeleiden ja maadoitusjohtimen ympäriltä. Näin voidaan havaita mahdollisia puutteita maadoituksessa tai kaapeloinnissa tutkimalla mittausten käyrämuotoja ja niiden välisiä vaihe-eroja. (PSK Standardisointi 2004)

2.6 Akseli- ja laakerijännitteen mittaaminen

Laakerijännitteen haitallisuutta laakerille voidaan arvioida mittaamalla sen suuruutta. Tällaisesta mittauksesta saadaan luokittelukelpoista tietoa ainoastaan silloin, kun laakereiden läpi ei kulje virtaa. Täysin luotettava laakerijännitemittaus vaatiikin laboratorioolosuhteet ja eristettyjen laakereiden käytön. Kuvassa 12 on esimerkki taajuusmuuttajakäytön laakerijännitteen ja -virranmittauksesta. (PSK Standardisointi 2004)



① Laakerijännitteen muutos

② Laakerijännitteen muutos ja öljykavon läpilyönti laakerissa

Kuva 12. Laakerijännite ja purkausvirta taajuusmuuttajakäytössä (PSK Standardisointi 2004, kuvaa muokattu)

Laakerijännitemittauksen perusteella ei kuitenkaan voida selvittää laakerivirran suuruutta. Tämä johtuu siitä, että laakerin impedanssin suuruus ja öljykavon läpilyöntikestoisuus ovat monesta eri muuttujasta riippuvaisia ja epälineaarisia. Laakerin impedanssin suuruus riippuu mm. kuormasta, lämpötilasta, pyörimisnopeudesta ja voiteluaineesta. Näin ollen läpilyönnin hetkellä piirin impedanssi on tuntematon, eikä piirissä kulkevan virran suuruutta saada laskettua. (PSK Standardisointi 2004)

Suoraan verkkoon kytketyissä sähkömoottoreissa jännite välillä akseli/laakeri - moottorin runko voi olla 1 – 2 V. Taajuusmuuttajakäytöissä sama jännite voi olla 8 – 15 V. (Fluke 2012)

Taulukoissa 5, 6 ja 7 on esitetty laakerijännitteille asetettuja raja-arvoja avoimessa piirissä.

TAULUKKO 5. Tasajännitteen haitallisuusasteet (PSK Standardisointi 2004)

Tasajännite U_{dc}	Haitallisuusluokitus
< 0,5 V	Hyvä, ei haitallinen
0,5 ... 0,7	Epävarma, voi olla haitallinen
> 0,7 V	Vaarallisen korkea arvo laakerille

TAULUKKO 6. Sinimuotoisten vaihtojännitteiden haitallisuusasteet (PSK Standardisointi 2004)

Vaihtojännitteiden tehollisarvo U_{rms}	Haitallisuusluokitus
< 0,3 V	Hyvä, ei haitallinen
0,3 ... 2,0 V	Epävarma, voi olla haitallinen
> 2,0 V	Vaarallisen korkea arvo laakerille

TAULUKKO 7. Vaihtojännitepulssien haitallisuusasteet (PSK Standardisointi 2004)

Jännitepulssien huippuarvot U_p	Haitallisuusluokitus
< 3 V	Hyvä, ei haitallinen
3 ... 10 V	Epävarma, voi olla haitallinen
> 10 V	Vaarallisen korkea arvo laakerille

Taulukoiden 5 ja 6 perusteella tasa- ja sinimuotoisella vaihtojännitteellä jännitealueet ovat hyvin lähellä toisiaan, jolloin jännitteen tehollisarvo sopii paremmin laakerijännitteen haitallisuuden arviointiin. PWM-taajuusmuuttajakäytöissä moottorin akselijännitteet ovat sen sijaan vaihtojännitepulsseja. Yleensä ne esiintyvät harvoin ja ovat lyhytkestoisia sekä korkeataajuisia. Näiden pulssien haitallisuutta laakereille arvioitaessa taulukossa 7 esitetty huippuarvo on paras suure. (PSK Standardisointi 2004)

3 TESTATUT MITTAUSMENETELMÄT

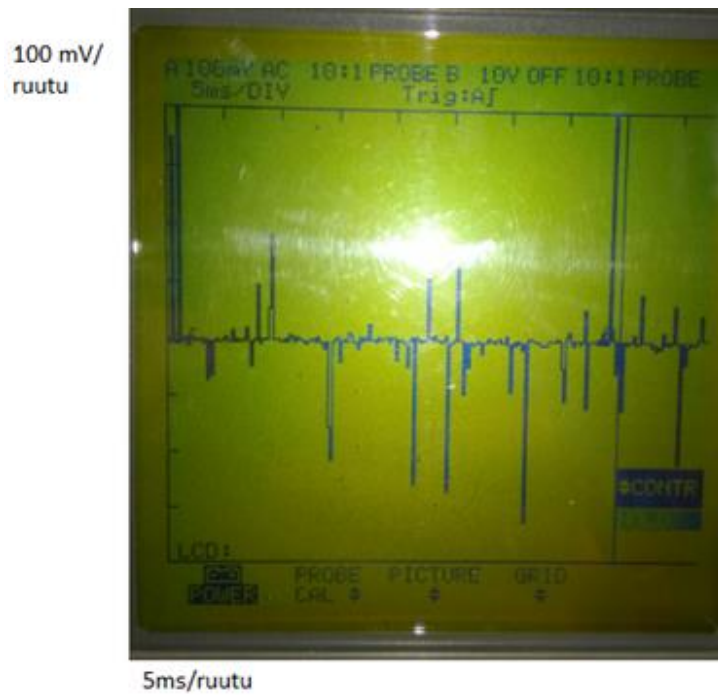
3.1 Testaaminen mittauskelalla

Ensin kokeilimme mitata laakerivirtoja pumppukäytössä olleesta 15 kW:n moottorista, jota ajettiin taajuusmuuttajalla 50 Hz taajuudella. Työssä käytettiin Philips PM 93 -digitaalista oskilloskooppia ja Teklab DOSC-20 -analogista oskilloskooppia. Tutkimme akselinmaadoitusvirtaa itse tehdyn mittakelan (kuva 13) avulla, joka asetettiin tutkittavan koneen akselin ympärille. Liitteessä 1 on esitetty tarkempi kuva mittausperiaatteesta.

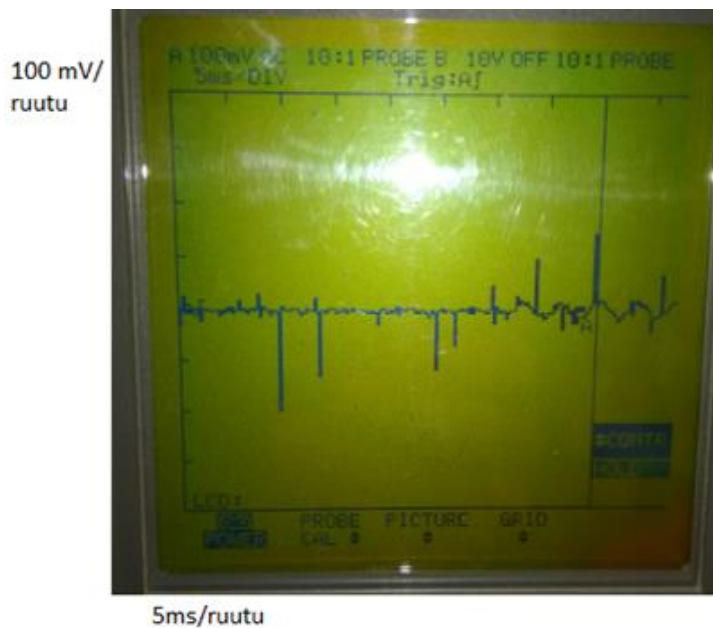


Kuva 13. Mittauksissa käytetty mittakela

Tutkimme mittakelan päiden väliin indusoitunutta jännitettä kun moottoria käytettiin suojaamattomalla kaapelilla ja suojatulla kaapelilla. Kuvassa 14 ja 15 on esitetty mittaus tulokset digitaalisella oskilloskoopilla. Tutkimuksissa käytetty mittapää toimi suhteessa 10:1, eli kuvissa näkyvät jännitepiikit ovat kymmenenkertaa suurempia kuin todellisuudessa.



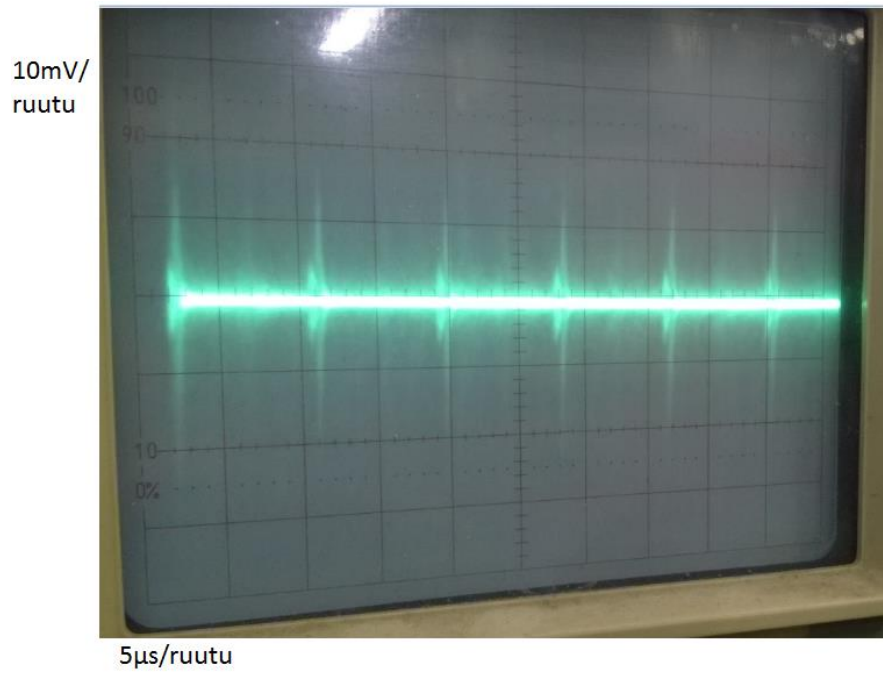
Kuva 14. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla digitaalisessa oskilloskoopissa



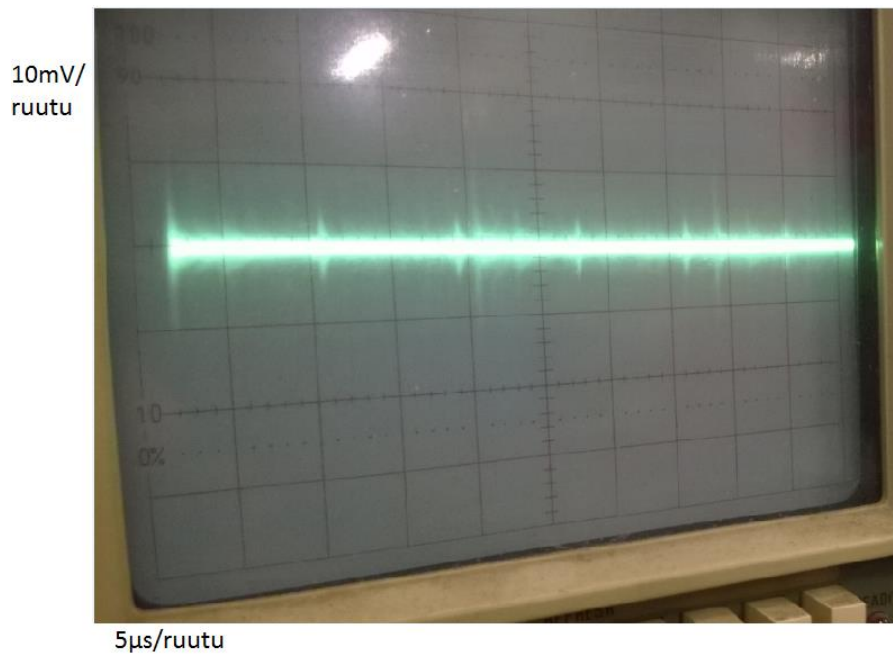
Kuva 15. Mittaus suojatulla kaapelilla digitaalisessa oskilloskoopissa

Jokainen kuvissa esiintyvä jännitepiikki kuvaa yhtä laakerin läpi purkautunutta virtapulssia. Kuvia 14 ja 15 vertailemalla havaitaan, että laakerivirtojen aiheuttamia jännitepiikkejä esiintyy huomattavasti harvemmin, kun käytetään suojattua moottorikaapelia suojaamattoman sijasta. Jännitepiikit ovat myös suuruudeltaan pienempiä suojatulla kaapelilla.

Seuraavaksi toistimme samat mittaukset, mutta vaihdoimme digitaalisen oskilloskoopin analogiseen oskilloskooppiin. Mittaustulokset on esitetty kuvissa 16 ja 17. Tutkimuksessa käytetty mittapää toimi suhteessa 1:1.



Kuva 16. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla analogisessa oskilloskoopissa



Kuva 17. Mittaus suojatulla kaapelilla analogisessa oskilloskoopissa

Myös kuvissa 16 ja 17 on havaittavissa, että suojatulla kaapelilla laakerivirtojen aiheuttamat jännitepiikit ovat pienempiä ja harvinaisempia, kuin suojaamattomalla kaapelilla.

Kuvan 16 perusteella jännitepiikit näyttävät esiintyvän $8\mu\text{s}$ välein. Tällöin laakerivirtojen taajuus kaavan 2 mukaisesti on:

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1}{8 \cdot 10^{-6}} = 125000 \text{ Hz} = 125\text{kHz} \quad (2)$$

Tämän testin avulla ei kuitenkaan voida määrittää tarkkoja akselijännitteiden tai laakerivirtojen arvoja, vaan on tyydyttävä pelkästään tutkimaan eri tilanteiden välisiä eroja.

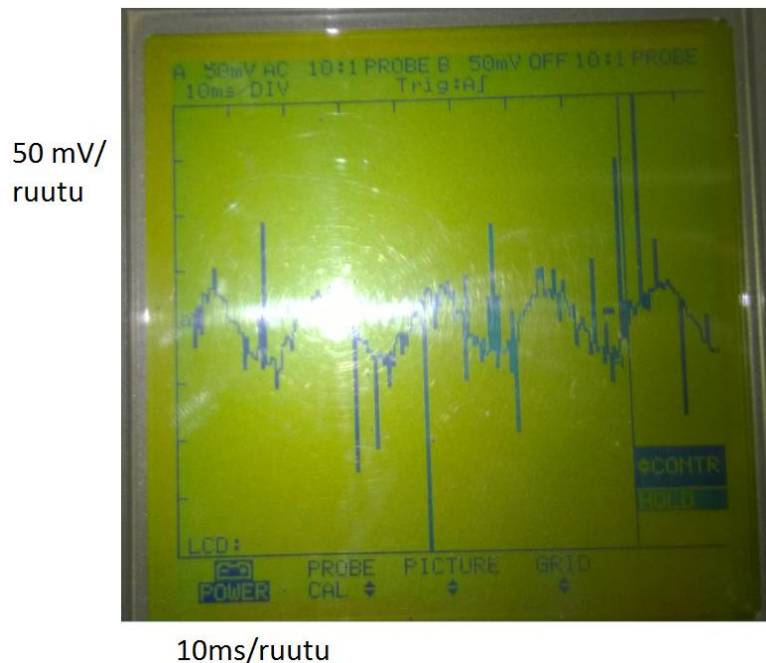
3.2 Testaaminen LEM flex -virta-anturilla

Seuraavaksi teimme mittauskelaa vastaavan testin, mutta korvasimme itse tehdyn mittakelan LEMin valmistamalla ”Flex model RR 300-SD/24” -virta-anturilla (kuva 18). Liitteessä 2 on esitettyä mittalaitteen tarkemmat tiedot. Tässäkin tutkimuksessa ajettiin 15 kW:n pumppukäytössä ollutta moottoria taajuusmuuttajalla 50 Hz taajuudella. Työssä käytettiin Philips PM 93 -digitaalista oskilloskooppia ja Teklab DOSC-20 -analogista oskilloskooppia. Liitteessä 1 on esitetty tarkempi kuva mittausperiaatteesta.

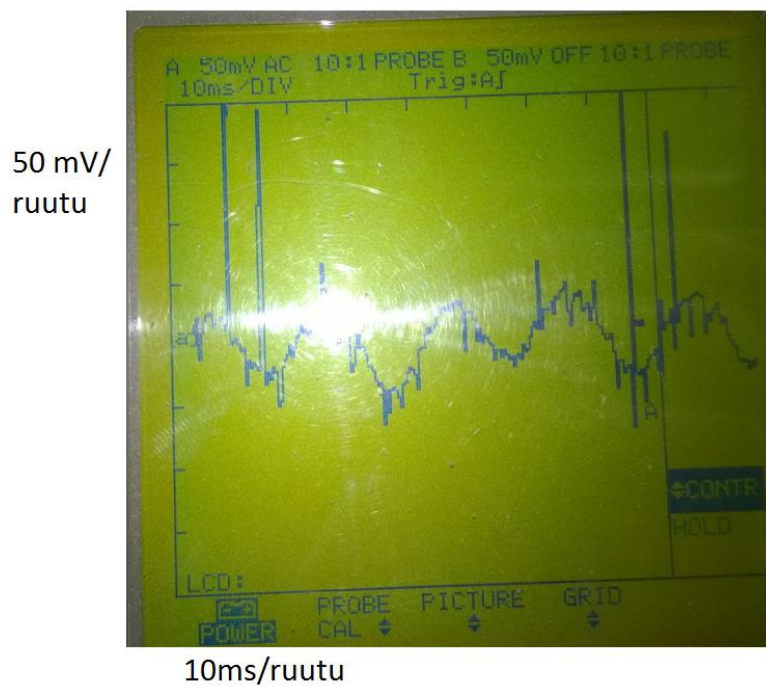


Kuva 18. Mittauksessa käytetty LEM flex RR300-SD/24 -virta-anturi

Tutkimuksessa käytettiin moottoria suojaamattomalla ja suojatulla -moottorikaapelilla. Virta-anturia käytettiin skaalauksella $1\text{ V} = 10\text{ A}$ ja se näytti mitatun tuloksen suhteessa 10:1, eli kuvissa näkyvät jännitepiikit ovat kymmenenkertaa suurempia kuin todellisuu-
dessa. Kuvassa 18 ja 19 on esitetty mittaustulokset digitaalisessa oskilloskoopissa.



Kuva 18. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla digitaalisessa oskilloskoopissa



Kuva 19. Mittaus suojatulla kaapelilla digitaalisessa oskilloskoopissa

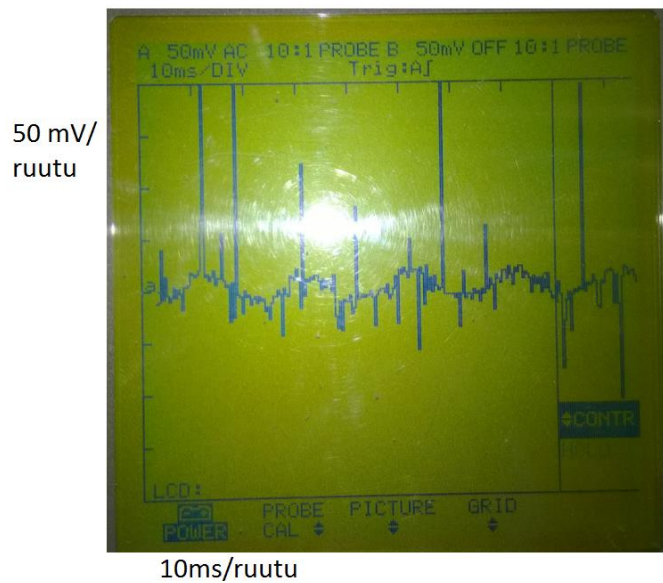
Kuvissa 18 ja 19 ei ole havaittavissa, että suojatulla kaapelilla ja suojaamattomalla kaapelilla olisi merkittävää eroa laakerivirtojen aiheuttamien jännitepiikkien suuruudessa tai taajuudessa. Molemmissa tapauksissa digitaalinen oskilloskooppi havaitsi pahimmillaan yli 20mV jännitepiikkejä. Nämä vastaavat yli 200 mA:n huippuvirtoja virta-anturin muuntosuhteen mukaan. Tällaiset piikit eivät ole taulukon 4 mukaan laakerille haitallisia. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että puutteellisella kaapeloinnilla toteutetuissa TAMU-käytöissä on havaittu laakerivirtavaurioita jo muutaman kuukauden jälkeen käyttöönnotosta. Tarkemmissa tutkimuksissa selvisi, että osa kuvissa 18 ja 19 esiintyvistä jännitepiikeistä saattavat olla mittalaitteen itse tuottamia.

Tämän jälkeen tutkimme laakerivirtapiikkejä LEMin mittalaitteella siten, että moottori-kaapelit taajuusmuuttajan kotelossa pujotettiin 40 x 25 x 15 Vitroperm-renkaan (kuva 20) läpi. Renkaalla on hyvät häiriön vaimennusominaisuudet, mutta toisaalta se kuumentuu voimakkaasti ja voi saavuttaa 65°C ympäristöään korkeamman lämpötilan (Kolkmecks 2013).

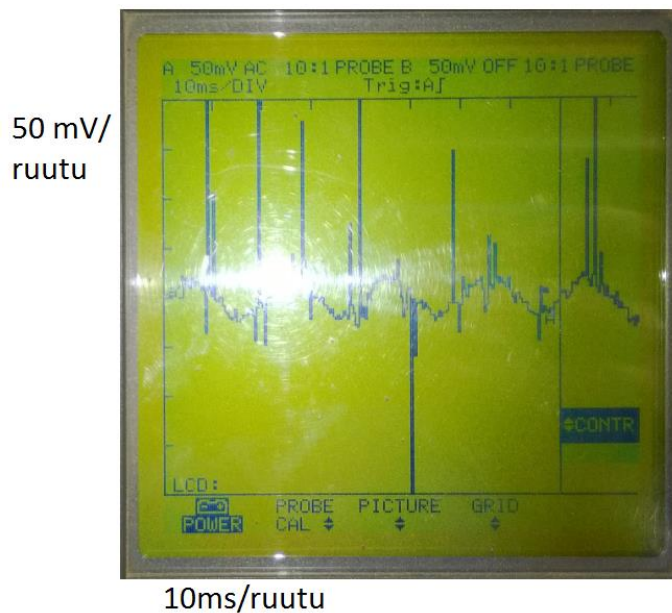


Kuva 20. Vitroperm-renkas (Vitroperm 2010)

Käytimme moottoria Vitroperm-renkaan kanssa suojatulla kaapelilla ja suojaamattomalla kaapelilla. Suojaamattoman kaapelin mittaustulos on esitettyä kuvassa 21 ja suojatun kaapelin kuvassa 22. Virta-anturia käytettiin skaalauksella 1 V = 10 A ja se näytti mitatun tuloksen suhteessa 10:1, eli kuvissa näkyvät jännitepiikit ovat kymmenenkertaa suurempia kuin todellisuudessa.



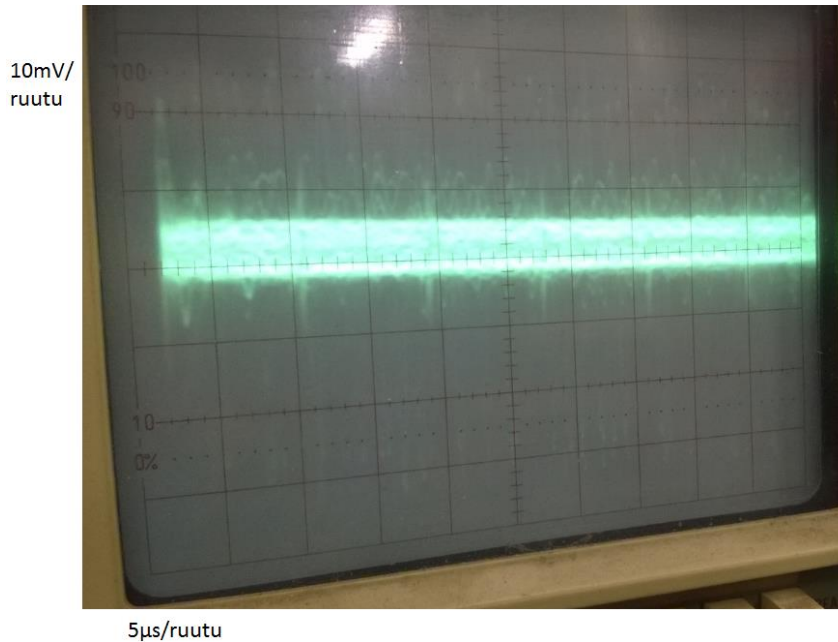
Kuva 21. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla Vitroperm-renkaan kanssa digitaalisessa oskilloskoopissa



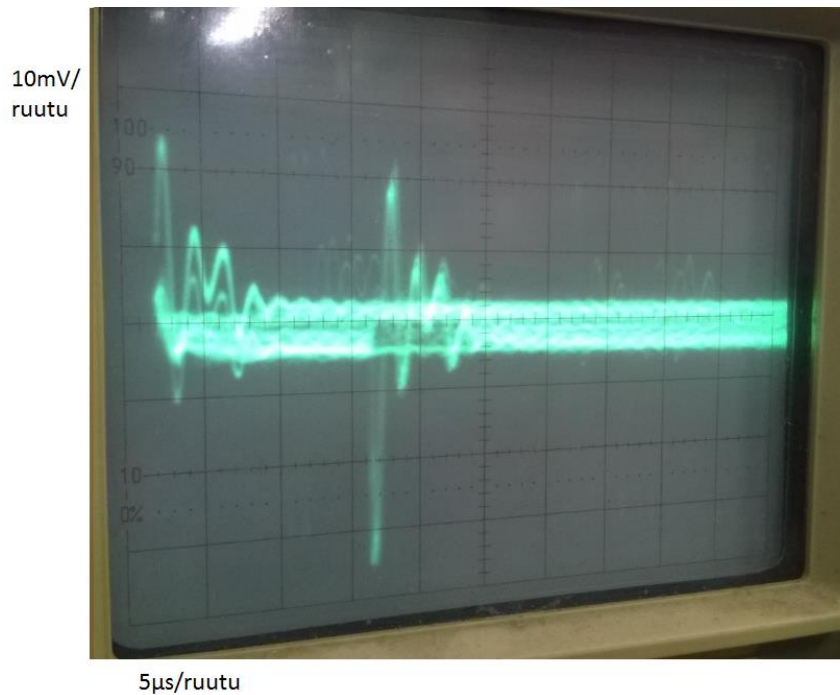
Kuva 22. Mittaus suojatulla kaapelilla Vitroperm-renkaan kanssa digitaalisessa oskilloskoopissa

Myös kuvissa 21 ja 22 ei ole havaittavissa merkittävää eroa kaapelointitapojen välillä ja molemmissa tapauksissa laakerivirtoja esiintyy huomattavan paljon. Molemmissa tapauksissa mittalaite havaitsee noin 200mA:n suuruisia huippuvirran arvoja, jotka eivät ole taulukon 4 mukaan laakerille haitallisia. Myös osa kuvissa 21 ja 22 näkyvistä jännitepiikeistä voivat olla mittalaitteen itse tuottamia.

Tämän jälkeen tutkimme LEMin virta-anturilla suojaamattoman ja suojatun kaapelin välisiä eroja ilman Vitroperm-rengasta, mutta korvasimme digitaalisen oskilloskoopin analogisella oskilloskoopilla. Mittaustulokset on esitetty kuvissa 23 ja 24. Virta-anturia käytettiin skaalauksella $1\text{ V} = 10\text{ A}$ ja se näytti mitatun tuloksen suhteessa 1:1.



Kuva 23. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla analogisessa oskilloskoopissa



Kuva 24. Mittaus suojatulla kaapelilla analogisessa oskilloskoopissa

Kuvissa 23 ja 24 näkyy virta-anturin aiheuttama kohina hyvin selkeästi ja varsinaisia laakerivirtapiikkejä on vaikea havaita. Lisäksi suojatulla kaapelilla mitattaessa mittauksen alkuun tuli aina samanlainen kahdesti toistuva jännitepiikki. Epäilimme tämän piikin olevan peräisin mittalaitteesta.

Itse tehdyn mittakelan perusteella määritimme laakerivirtapiikkien taajuudeksi 125kHz. LEMin virta-anturin luotettava mitta-alue on 8 Hz - 100kHz. Tämän perusteella on syytä epäillä, että virta-anturi ei välttämättä edes havaitse kaikkia virtapiikkejä tai vaimentaa niitä. Lisäksi laite itsessään tuottaa välillä jännitepiikkejä, jotka sekoittuvat laakerivirtojen aiheuttamien jännitepiikkien sekaan. Näillä perusteilla testattu laite ei sovellu kovin hyvin laakerivirtojen mittaamiseen.

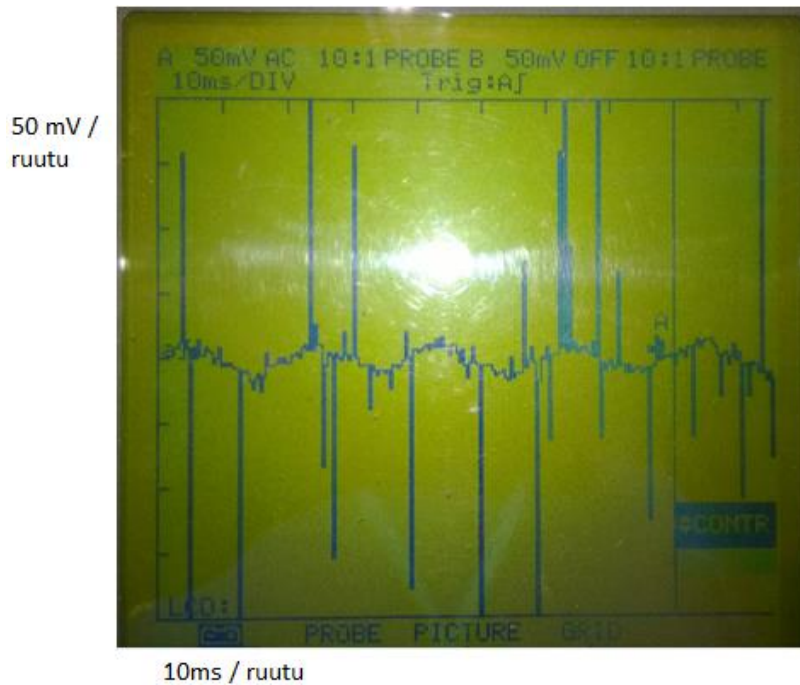
3.3 Testaaminen PEM CWT1 -Rogowskin kelalla

Seuraavaksi jatkoimme akselinmaadoitusvirtojen tutkimista siten, että mittalaitteeksi valittiin PEMin valmistama CWT1 -Rogowskin kela (kuva 25). Liitteessä 3 on esitettynä mittalaitteen tarkemmat tiedot. Tässäkin tutkimuksessa ajettiin 15 kW:n pumppukäytössä ollutta moottoria taajuusmuuttajalla 50 Hz taajuudella. Työssä käytettiin Philips PM 93 -digitaalista oskilloskooppia. Liitteessä 1 on esitetty tarkempi kuva mittausperiaatteesta.

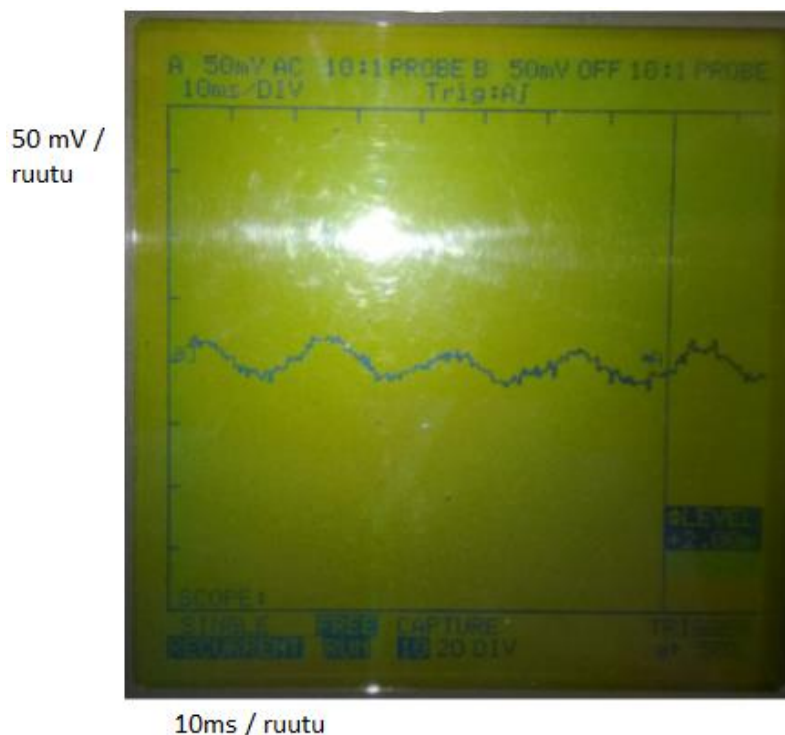


Kuva 25. Mittauksessa käytetty PEM CWT1-Rogowskin kela (PEM 2010)

Tutkimuksessa käytettiin moottoria suojaamattomalla ja suojatulla -moottorikaapelilla. Rogowskin kelan skaalaus oli 20mV / A ja se näytti mitatun tuloksen suhteessa 10:1, eli kuvissa näkyvät jännitepiikit ovat kymmenenkertaa suurempia kuin todellisuudessa. Kuvassa 26 ja 27 on esitetty mittaustulokset digitaalisessa oskilloskoopissa.



Kuva 26. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla digitaalisessa oskilloskoopissa



Kuva 27. Mittaus suojatulla kaapelilla digitaalisessa oskilloskoopissa

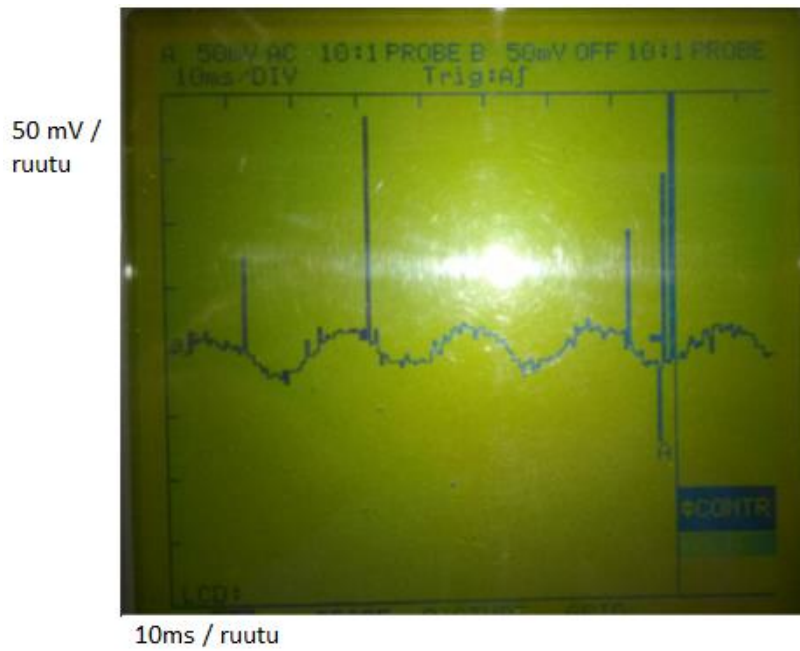
Kuvia 26 ja 27 vertailtaessa on havaittavissa hyvin selkeä ero. Kuvassa 26 näkyy laitteen itse tuottaman sinimuotoisen jännitteen lisäksi hyvin paljon voimakkaita ja tiheästi toistuvia laakerivirtojen aiheuttamia jännitepiikkejä. Kuvassa 27 näkyy ainoastaan laitteen itse tuottama jännite. Kuvassa 26 esiintyvät, suurimmat jännitepiikit ovat yli 20mV. Nämä vastaavat yli 1 A:n huippuvirtoja virta-anturin muuntosuhteen mukaan. Tällaiset piikit voivat olla taulukon 4 mukaan haitallisia laakerille. Tämä tukee havaintoa siitä, että puutteellisella kaapeloinnilla toteutetuissa TAMU-käytöissä on havaittu laakerivirtavaurioita jo muutaman kuukauden jälkeen käyttöönotosta.

Tämän jälkeen tutkimme laakerivirtapiikkejä PEMin mittalaitteella siten, että moottori-kaapelit taajuusmuuttajan kotelossa pujotettiin Würth Elektronikin valmistaman 40,6 x 27,4 x 15 -ferriittirenkaan (kuva 28) läpi. Tämän lisäksi vaihdoimme ferriittirenkaan tilalle jo aiemmin käyttämämme Vitroperm-renkaan. Käytetyn renkaan on tarkoitus vaimentaa yhdenmuotoista jännitettä ja muuttaa sen sisältämää energiaa lämmöksi.

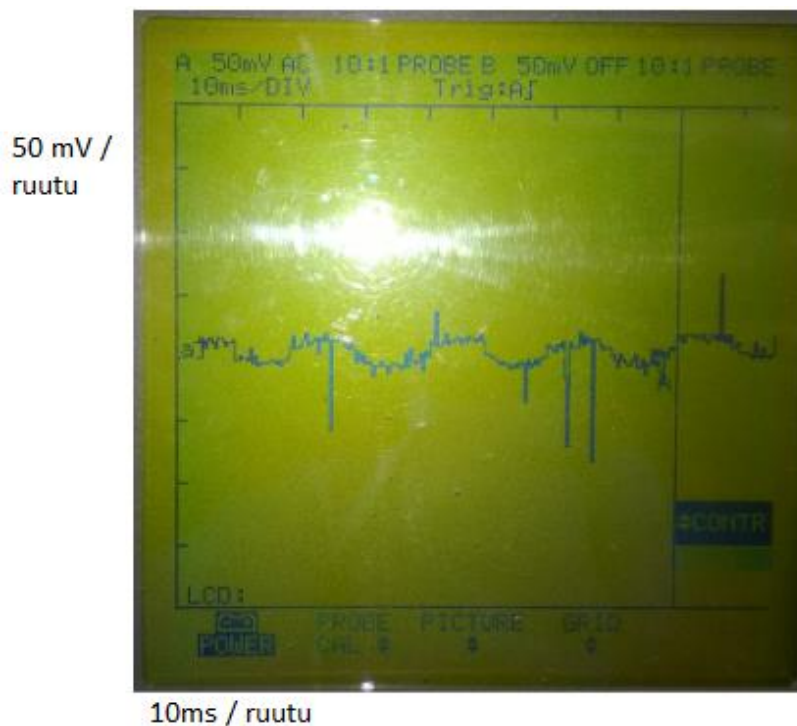


Kuva 28. Ferriittirengas (Würth Elektronik 2014)

Käytimme moottoria ferriittirenkaan ja Vitroperm-renkaan kanssa suojaamattomalla kaapelilla. Ferriittirenkaan mittaustulos on esitettyä kuvassa 29 ja Vitroperm-renkaan kuvassa 30. Virta-anturin skaalaus on 20mV / A ja se näytti mitatun tuloksen suhteessa 10:1, eli kuvissa näkyvät jännitepiikit ovat kymmenenkertaa suurempia kuin todellisuudessa.



Kuva 29. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla ferriittirenkaan kanssa digitaalisessa oskilloskoopissa



Kuva 30. Mittaus suojaamattomalla kaapelilla Vitroperm-renkaan kanssa digitaalisessa oskilloskoopissa

Kuvissa 29 ja 30 on havaittavissa, että kummallakin renkaalla laakerivirtoja esiintyy harvemmin verrattuna tilanteeseen, jossa käytetään ainoastaan suojaamatonta kaapelia.

Ferriittirengasta käytettäessä esiintyy kuitenkin voimakkaita, yli 1A huippuvirtoja, jotka voivat olla laakerille haitallisia taulukon 4 mukaan. Sen sijaan käytettäessä Vitroperm-rengasta voimakkaimmat huippuarvot ovat noin 0,5 A. Tällaiset virrat eivät ole laakerille haitallisia.

PEM CWT1 -mittalaitteella saimme mittaustuloksissa esille selkeitä eroja, jotka tukevat tiedossa ollutta teoriaa. Tehtyjen tutkimusten perusteella kyseinen laite soveltuu hyvin laakerivirtojen mittaamiseen pumppukäytöissä.

4 MUITA MAHDOLLISIA MITTAUSMENETELMIÄ

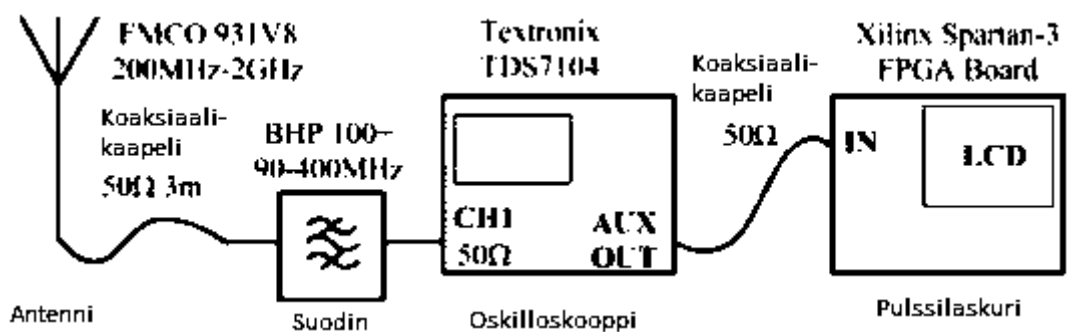
4.1 Radiotekniikan perustuva mittausmenetelmä

Laakerikipinöintiin liittyvät nopeat virtapulssit aiheuttavat UHF-taajuista sähkömagneettista säteilyä. Sopivaa antennia käyttämällä laakerivirtapulsseja voidaan siis havaita sähkömoottorin ulkopuolelta. Tämä mahdollistaa mittauksen tekemisen kentällä ajossa olevasta sähkömoottorista ilman monimutkaisia mittausjärjestelyitä. (Lehtisare 2009)

Kuvissa 31 ja 32 on esitetty laakerikipinöinnin mittauslaitteisto ja sen rakenne.

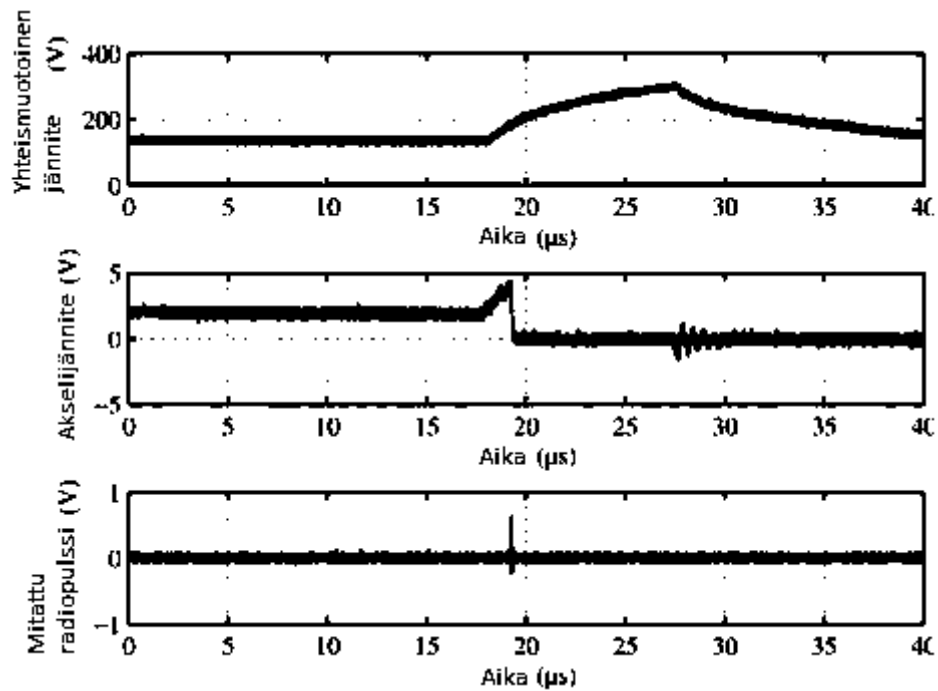


Kuva 31. Laakerikipinöinnin mittauslaitteisto (Ahola 2011)

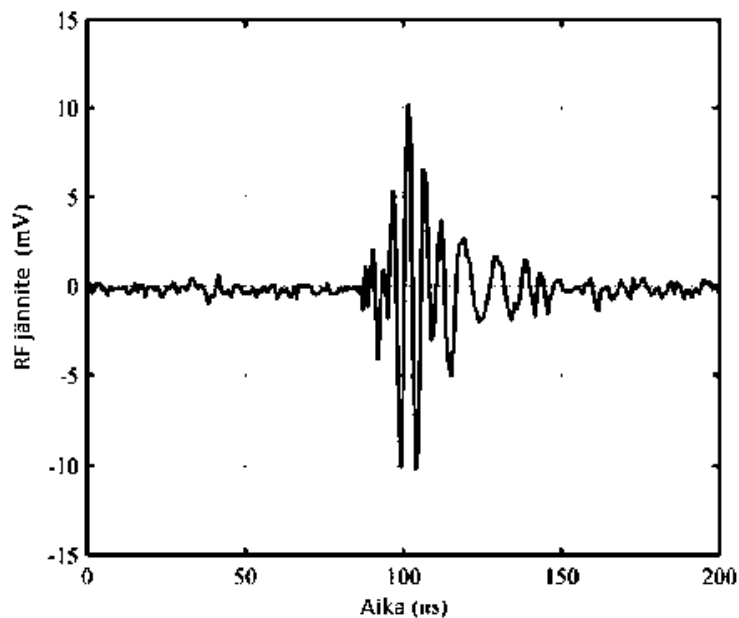


Kuva 32. Laakerikipinöinnin mittauslaitteiston rakenne (Ahola 2011, kuvaa muokattu)

Kuvissa 33 ja 34 on esimerkki laakerikipinöintimittauslaitteistolla laboratorio-olosuhteissa tehdystä mittauksesta.



Kuva 33. Esimerkki laakerikipinöintimittauksista (Ahola 2011, kuvaa muokattu)



Kuva 34. Edellisen kuvan radiopulssi aikatasoon skaalattuna (Ahola 2011, kuvaa muokattu)

4.2 Mittaaminen Fluke 190 Series II ScopeMeter -oskilloskoopilla

Jännitteen mittaaminen nopeasti pyörivältä akselilta on vaarallista ja vaikeaa. Tätä tarkoitusta varten on kehitelty mittapää (kuva 35), jonka avulla akselijännitteen mittaaminen on turvallisempaa. Mittalaitteen kontakti akselille toteutetaan pienen, johtavan harjan avulla. Mittapäättä voi pitää kädessä tai magneettisella jalustalla. (Aegis 2012, Fluke 2012)



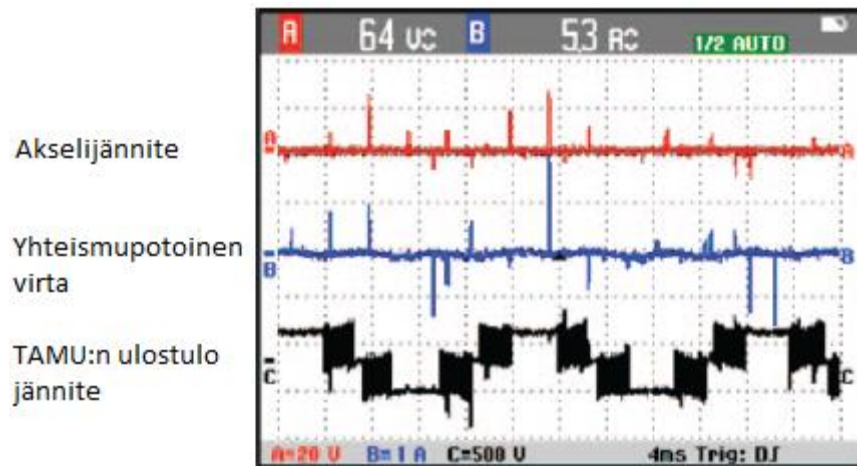
Kuva 35. Mittapää akselijännitteen mittaamiseen (Aegis 2012)

Taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamat akselijännitteet ja virtapiikit ovat hyvin lyhyitä, usein vain joitakin mikrosekunteja. Tämän takia mittalaitteella täytyy olla laaja kaistanleveys ja nopea näytteenottoaika. Fluke 190 Series II ScopeMeter -oskilloskooppi (kuva 36) sopii tähän tarkoitukseen. Lisäksi oskilloskoopilla voi tallentaa ja katsoa neljää signaalia, joten sillä voi tutkia yhtäaikaaisesti esimerkiksi akseli-, yhdenmuotoista - ja TAMU:n tuottamaa jännitettä. (Fluke 2012)



Kuva 36. Fluke 190 Series II ScopeMeter -oskilloskooppi (Fluke 2012)

Kuvassa 37 on esimerkki Fluken oskilloskoopilla tehdystä akselijännitemittauksesta.



Kuva 37. Esimerkki akselijännitemittauksesta (Fluke 2012, kuvaa muokattu)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämän työn tarkoituksena oli etsiä kenttäolosuhteisiin soveltuva, luotettava mittaussuunnitelma taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamien laakerivirtojen havaitsemiseksi pumpukäytöissä. Koska kentällä olevat pumpukäytöt ovat hyvin usein ahtaissa ja hankalissa tiloissa, täytyy mittalaitteiston olla pieni ja helposti käsiteltävissä.

Akselijännitteen mittaaminen nopeasti pyörivältä akselilta on haastavaa ja vaarallista. Tämän takia jo heti työn alkuvaiheessa päätettiin, että akselijännitteen mittaaminen on turvallisuussyistä poissuljettu vaihtoehto.

Itse tehdyllä mittakelalla tehdyissä tutkimuksissa havaittiin laakerivirtojen aiheuttamia jännitepiikkejä. Menetelmässä on huonona puolena se, että jännitepiikin aiheuttaneen virran suuruus jää tuntemattomaksi. Lisäksi laite on työläs asettaa pumpun akselin ympärille, joten se ei sovellu kovin hyvin kenttäolosuhteisiin. Laitteella voi kuitenkin tehdä laboratorio olosuhteissa tutkimuksia, joissa vertaillaan esimerkiksi eri kaapelointimenetelmien välisiä eroja.

LEM:n valmistamaa virta-anturia on helppo käyttää ja käsitellä. Näin ollen se sopii hyvin kenttäolosuhteisiin. Lisäksi mittalaitteella saadaan virran arvot selville. Valitettavasti mittalaitteella ei kuitenkaan saatu luotettavia mittaustuloksia. Tämä johtuu siitä, että mittalaite itse aiheuttaa voimakkaita jännitepiikkejä, jotka sekoittuvat laakerivirtojen aiheuttamien jännitepiikkien sekaan. Laakerivirtojen suuren taajuuden takia myös mittalaitteelta vaaditaan laaja taajuusalue. LEM:n mittalaitteen suurin luotettava taajuus on 100kHz (LEM). Tämä on laakerivirtojen mittaamiseen riittämätön ja näin ollen voidaan olettaa, että mittalaite ei havaitse kaikkia laakerivirtoja tai vaimentaa niitä. LEM:n valmistama virta-anturi ei sovellu laakerivirtojen mittaamiseen.

PEM:n valmistamalla Rogowskin kelalla saatiin jo tiedossa ollutta teoriaa tukevia mittaustuloksia. Laitteella saadaan myös virran arvot selville ja sen suurin taajuus riittää laakerivirtojen mittaamiseen. Lisäksi mittalaite on kenttäolosuhteisiin hyvin soveltuva. Näin ollen opinnäytetyölle asetettu tavoite voidaan katsoa täyttyneeksi. Jatkossa mittalaite on tarkoitus antaa huoltomiehen mukaan. Jos laakerivirtavikaa epäillään, on se helppo todentaa mittalaitteen avulla.

LÄHTEET

- ABB. 2000. Tekninen opas 5, Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä. Haettu 28.1.2014 osoitteesta [http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/\\$file/Tekninenopasnro5.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/$file/Tekninenopasnro5.pdf)
- Aegis 2012. Aegis Shaft Voltage Probe. Haettu 15.5.2014 Osoitteesta <http://www.est-aegis.com/datasheets/ProbeDatashheetform800-1.pdf>
- Ahola, J. 2011. Taajuusmuuttajaohjattujen sähkömoottorikäyttöjen laakerivirrat ja niiden mittaaminen. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Luentomoniste. Haettu 28.1.2014 osoitteesta https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl50a0600/materiaali/tamu_ohjattujen_sahkokayttojen_laakerivirrat.pdf.
- Directindustry. 2014. Haettu 6.3.2014 osoitteesta <http://www.directindustry.com/prod/wqk-bearing-manufacture-co-ltd/self-aligning-ball-bearings-86675-817437.html>
- Erdman, J., Kerkman, R.J., Schlegel, D., Skibinski, G. 1995. Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages. Haettu 12.5.2014 osoitteesta http://www.researchgate.net/publication/3170111_Effect_of_PWM_inverters_on_AC_motor_bearing_currents_and_shaftvoltages/file/6a85e52d94bc8c62d7.pdf.
- Fluke. 2012. Fluke Corporation. Measuring motor shaft voltage and bearing currents with the Fluke 190 Series II ScopeMeter. Haettu 25.2.2014 osoitteesta <http://www.fluke.com/fluke/uken/products/measuring-motor-shaft-voltage.htm>
- Fläkt Woods. 2007. Fläkt Woods Oy, Laakerivauriot kuriin oikealla asennuksella. Haettu 7.2.2014 osoitteesta <http://www.flaktwoods.fi/yrityksemme/asiakaslehti/dfe8d0d8-9af5-4ec6-8dca-95e79283eb4a>
- Kolmeks. 2013. Kolmeks Oy. Laakerivirtatetit -materiaali
- Kolmeks. 2014. Kolmeks Oy, kotisivut. Luettu 3.3.2014 osoitteessa www.kolmeks.fi
- Lehtisare, M. 2009. Laakerikipinöintilaskurin toteuttaminen FPGA- piirillä. Kandidaatintyö. Haettu 28.1.2014 osoitteesta <http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/59101/nbnfi-fe201002041293.pdf?sequence=3>
- LEM. (ei pvm). LEM~flex Series Portable and Flexible Current Probe. Haettu 6.3.2014 osoitteesta <http://www.set.nl/LEM/flexprobe.htm>
- Lutze 2014. Lutze DRIVEFLEX 3 Symmetrical Grounds, Shielded. Haettu 4.3.2014 osoitteesta <http://www.driveflex.com/pdf/a219.pdf>
- Mikkonen, H. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito: käsikirja. Helsinki: KP-Media Oy

PEM. 2010. PEM CWT Specification. Haettu 12.5.2014 osoitteesta
http://www.pemuk.com/Userfiles/CWT/cwt_1110.pdf

PSK Standardisointi. 2004. PSK 7708 Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Akselijännitteen ja -virran mittausta

Vitroperm. 2010. Nanocrystalline Vitroperm EMC Products. Haettu 8.5.2014 osoitteesta
http://www.vacuumschmelze.com/fileadmin/Medienbibliothek_2010/Downloads/KB/Vitrop_EMV_EN_full.pdf

Würth Elektronik. 2014. WE-TOF EMI Suppression Toroidal Ferrite. Haettu 15.5.2014 osoitteesta <http://katalog.we-online.de/en/pbs/WE-TOF?sid=5971d2adad>

LIITTEET

Liite 1. Akselinmaadoitusvirran mittausperiaate



LEM-Flex Series Current Probes Specifications

Output:	Maximum	3.0VAC or ± 4.2 VPK
	Load	>500 Ohms
	Scaling, switchable:	RR 300 - 30A/300A @ 100mV/10mV per amp
		RR 3000 - 300A/3kA @ 10mV/1mV per amp
		RR 6000 - 600A/6kA @ 5mV/0.5mV per amp
	Accuracy:	$\pm 1.0\%$
	Linearity:	$\pm 0.05\%$
	Repeatability:	$\pm 0.1\%$
	Frequency Resp.:	(-3dB points): 8Hz to 100kHz
	Phase error (max):	$< \pm 0.5^\circ$ 50-60hz
	Noise (max):	1.0mV ac
	DC offset (max):	<1.0mv
	Temperature Range:	Electronics
Head		-20°C to 90°C (-4°F to 194°F)
Temperature Sensitivity:	Gain change (max)	$\pm 0.08\%/^\circ\text{C}$
	DC offset (max)	$\pm 0.006\text{mV}/^\circ\text{C}$
Power:	Source	+3.0VDC/100mA from (2) 1.5V Type "AA" alkaline cells or by mini power connector (2.1 mm) on end of enclosure. Battery life (full scale input current @ 60 Hz) 25...30 Hrs.
		(Range and Power) LED Flashes once per 3 seconds if the Current Probe is on and the battery voltage is good.
Controls:	Switch	RR 300-SD/## - 30A/OFF/300A RR 3000-SD/## - 300A/OFF/3kA
Transducer	Safety Rating	Double Insulated Installation Cat. III Pollution Degree 2, 600VAC to Earth
	Material	TPE rubber, Polypropylene
	Minimum bending radius	1.5 in. (38.1 mm)
	Cable Diameter	0.625 in. (15.87 mm)
	Coupling O.D.	0.875 in. (22.2 mm)

Dimensions (Standard Transducers)

.../24	Length (Open)	24 in. (610 mm)
	O.D. (Closed)	8.3 in. (209.9 mm)
	I.D. (Closed)	7 in. (178.2 mm)
	Weight	0.4 lbs. (0.18 kg)
.../36	Length (Open)	36 in. (915 mm)
	O.D. (Closed)	12.0 in. (305 mm)
	I.D. (Closed)	10.9 in. (277 mm)
	Weight	0.6 lbs. (0.27 kg)
.../48	Length (Open)	48 in. (1220 mm)
	O.D. (Closed)	15.9 in. (404.0 mm)
	I.D. (Closed)	14.7 in. (372.2 mm)
	Weight	0.8 lbs. (0.36 kg)
Interconnection Cable Safety Rating		Double Insulated Installation Category III Pollution Degree 2, 600VAC to Earth Length (Standard) 78.7 in. (2.0 m)
Electronics Package	Material	ABS Plastic
	Dimensions	1.0H x 2.4W x 3.8D in. (25.4H x 71.0W x 96.5D mm)
	Weights	0.1 lbs. (0.045 kg)
	Input	LEM~Flex Transducer
	Output Connector	BNC Female
Isolation:	Head Hi-Pot test	5000VAC for 1 minute surface to output
		Maximum recommended working voltage 600VAC
Position Sensitivity	On conductor (max)	±1.0%
	Off conductor, (Stray field max)	±1.0%
Standard Delivery:	LEM~Flex: Head, electronics and batteries Output cable: BNC Male to BNC Male 12 in. (304.8 mm) Adapter: BNC Female to Dual Banana Plug	
Options:	Ext. Power Supply +3.0VDC/340mA with CE Mark	

(LEM)

PERFORMANCE CHARACTERISTICS

Type	Sensitivity (mV/A)	Peak current (kA)	Peak d/dt (kA/μs)	Noise max ¹ (mV @ 30mA)	Droop typ. (%/ms)	LF (3dB) bandwidth typ. (Hz) f _L	Phase lead at 50Hz typ. (deg)	HF (3dB) bandwidth typ. (MHz) f _H ²	
								Coil Length 300mm	Coil Length 700mm

High Sensitivity Ranges of CWT ... measuring currents from 300mA

CWT015	200.0	0.03	0.2	6.5	130	150	2.0 @ 6kHz	6	4
CWT03	100.0	0.06	0.4	4.5	90	105	2.0 @ 4kHz	10	6.5
CWT06	50.0	0.12	0.8	3.0	70	80	2.0 @ 3kHz	16	10
CWT1	20.0	0.3	2.0	2.5	40	50	1.9 @ 2kHz	16	10
CWT1N	20.0	0.3	2.0	2.0	20	25	1.9 @ 1kHz	10	5
CWT3	10.0	0.6	4.0	8.0	3.0	3.5	1.0 @ 300Hz	16	10

Standard Ranges of CWT ... measuring currents from 15A

CWT3N	10.0	0.6	4.0	14.0	0.9	1.0	1.7	10	5
CWT6	5.0	1.2	8.0	14.0	0.9	1.0	1.7	16	10
CWT15	2.0	3.0	20.0	7.0	0.7	0.8	1.3	16	10
CWT30	1.0	6.0	40.0	5.0	0.5	0.6	0.9	16	10
CWT60	0.5	12.0	40.0	3.5	0.35	0.4	0.6	16	10
CWT150	0.2	30.0	40.0	3.0	0.2	0.2	0.3	16	10
CWT300	0.1	60.0	40.0	3.0	0.1	0.1	0.2	16	10
CWT600	0.05	120.0	40.0	3.0	0.06	0.05	0.1	16	10
CWT1500	0.02	300.0	40.0	3.0	0.035	0.03	0.06	16	10

¹ Distributed around the f_L (-3dB) bandwidth.

² For 2.5m cable length. Contact PEM for values of f_H for other coil and cable lengths

TYPICAL ACCURACY	Traceable calibration to ±0.2% with conductor central in the loop Variation with conductor position in the coil loop typically ±1%		TYPICAL LINEARITY	±0.05% (Full Scale)
ABSOLUTE MAXIMUM VALUES OF d/dt (kA/μs) (value must not be exceeded)	CWT 03, 06	PEAK 40.0	RMS 12 @ 70°C	
	CWT 015, 1N, 3N	PEAK 20.0	RMS 10 @ 70°C	
	all other CWT's	PEAK 40.0	RMS 1.5 @ 70°C	(further information available on request)