

VAASAN YLIOPISTO

TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

SÄHKÖTEKNIikka

Arttu Hyvönen

PIENTEN OIKOSULKUMOOTTOREIDEN LAAKERIVIRRAT

Työ on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Vaasassa 13.5.2016

Työn valvoja

Timo Vekara

Työn ohjaaja

Matti Fyhr

Työn tarkastaja

Jere Kolehmainen

ALKULAUSE

Tämä diplomityö on tehty toimeksiantona ABB Oy Motors&Generators Vaasan yksikköön.

Haluaisin osoittaa suuret kiitokset ABB Oy:n tuotekehitysosastolle sekä ohjaajalleni Matti Fyhrille ja valvojalleni Timo Vekaralle, suuresta avusta työn eri vaiheissa.

Eriyiset kiitokset osoitan vaimolleni, joka on tukenut ja kannustanut työn edetessä. Kiitokset kuuluvat myös kotiväelleni tuesta ja asiantuntevista kommentteista.

Vaasassa 13.5.2016

Arttu Hyvönen

SISÄLLYSLUETTELO

ALKULAUSE	2
SISÄLLYSLUETTELO	3
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
TIIVISTELMÄ	7
ABSTRACT	8
1 JOHDANTO	9
2 LAAKERIVIRRRAT SÄHKÖMOOTTOREISSA	13
2.1 Moottorin sähköinen rakenne	14
2.2 Suuritaajuisten laakerivirtojen syntyminen	16
2.2.1 Kiertävä virta	17
2.2.2 Akselin maadoitusvirta	18
2.2.3 Kapasitiivinen purkausvirta	19
2.3 Laakerin vauriot	22
3 LAAKERIVIRTOJEN EHKÄISYMENETELMÄT	24
3.1 Suuritaajuisten laakerivirtojen ehkäisy ja vahinkojen välttäminen	26
3.1.1 Monijohdinkaapelit	26
3.1.2 Lyhyt impedanssireitti	27
3.1.3 Suuritaajuiset maadoituskytkennät	29
3.2 Muita laakerivirtojen ehkäisymenetelmiä	29
3.2.1 Akselin maadoitus	29
3.2.2 Hybridilaakerit	32
3.2.3 Laakerin eristys tai pinnoitus	32
3.2.4 Eristävä kytkin	33

3.2.5	Laakerin voitelu	34
3.2.6	Sähköstaattinen suoja	35
3.2.7	Suodattimet	36
4	MITTAUKSIEN TULOKSET	39
4.1	M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset	43
4.2	HXA 132SMD 4-napaisen moottorin mittaukset	51
4.3	Taajuusmuuttajan vaikutus laakerivirtoihin	59
4.4	Moottorimallin vaikutus akselijännitteisiin	60
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	67
	LÄHDELUETTELO	70

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Kreikkalaiset symbolit

Φ	Magneettivuo (Wb)
ϵ_0	Tyhjiön permittiivisyys
ϵ_r	Eristeen suhteellinen permittiivisyys
η	Hyötysuhde
μ_r	Eristeen suhteellinen permeabiliteetti
τ_p	Napajako
τ_v	Vyöhykejako

Muut symbolit

A	Levykondensaattorin pinta-ala (m ²)
C	Kapasitanssi (F)
c	Valon nopeus (m/s)
C_{ar}	Akselin ja rungon välinen hajakapasitanssi (F)
C_{ka}	Käämin ja akselin välinen hajakapasitanssi (F)
$C_{laakeri}/C_b$	Laakerin kapasitanssi (F)
$\cos \varphi$	Tehokerroin
d	Eristeen paksuus (m)
e	Lähdejännite (V)
f	Taajuus (Hz)
I	Sähkövirran voimakkuus (A)
L	Induktanssi (H)
L_{kr}	Kaapelin kriittinen pituus (m)

m_v	Vaiheluku
p	Napapariluku
P	Teho (W)
q	Vakoluku
Q	Staattorin tai roottorin uraluku
t_r	Jännitteen nousuaika (s)
U	Jännite (V)
U_{cm}	Yhteismuotoinen jännite (V)
$U_{laakeri}$	Laakerin yli oleva jännite (V)
v	Jännitepulssin etenemisnopeus (m/s)
v_b	Akselijännite (V)
v_{com}	Yhteismuotoinen jännite (V)
X_C	Kapasiivinen reaktanssi (Ω)
X_L	Induktiivinen reaktanssi (Ω)

Lyhenteet

BVR	Laakerijännitesuhde (Bearing voltage ratio)
DOL	Suora verkkokäyttö (Direct On Line)
EDM	Kipinätyöstö (Electrical Discharge Machining)
EMC	Sähkömagneettinen sopivuus (Electromagnetic compatibility)
PWM	Pulssinleveysmodulaatio (Pulse-Width Modulation)
RMS	Tehollisarvo (Root mean square)

VAASAN YLIOPISTO**Teknillinen tiedekunta**

Tekijä:	Arttu Hyvönen	
Diplomityön nimi:	Pienten oikosulkumoottoreiden laakerivirrat	
Valvoja:	Timo Vekara	
Ohjaaja:	Matti Fyhr	
Tarkastaja:	Jere Kolehmainen	
Tutkinto:	Diplomi-insinööri	
Oppiaine:	Sähkötekniikka	
Opintojen aloitusvuosi:	2011	
Diplomityön valmistumisvuosi:	2016	Sivumäärä: 73

TIIVISTELMÄ

Laakerin toiminta ja käyttöikä vaikuttavat koko moottorin toimintaan. Hyvän ja toimivan laakerin käyttö pidentää koneen käyttöikä. Mekaanisen rasituksen lisäksi laakeriin kohdistuu myös sähkövirrasta aiheutuva rasitus. Työn tarkoituksena on selvittää pienten sähkömoottorien (nimellistehoaltaan alle 30 kW) laakerivirtoja ja keinoja niiden ehkäisyyn. Nykyisessä niin sanotussa uudessa moottorimallissa laakerivirtojen määrä on lisääntynyt huomattavasti, joten testien ja teorian pohjalta pyritään määrittämään uuden ja vanhan moottorityypin eroja.

Laakerivirtoja synnyttää vaihtovirtakoneen staattorin indusoima, koneen sisäinen yhteismuotoinen jännite. Yhteismuotoinen jännite on vaihejännitteiden summa ajanhetkellä. Heilahteluja yhteismuotoisessa jännitteessä saa aikaan taajuusmuuttajien syöttämän kolmivaihejännitteen epäsymmetria. Suuritaajuiset laakerivirrat voidaan jakaa kiertäviin virtoihin, akselin maadoitusvirtoihin ja kapasitiivisiin purkausvirtoihin. Kapasitiiviset virrat ovat yleisimpiä pienissä moottoreissa.

Kaapeloinnin toteutustavalla, kaapelityypillä, maadoituksella sekä laakerin eristyksellä on hyvin tärkeä merkitys laakerivirtojen ehkäisyssä. Kapasitiivisesti kytkeytyviä laakerivirtoja vastaan paras ja kestävin ratkaisu on muokata koneen laakerijännitesuhdetta. Laakerivirtaongelmiin ei laakerijännitesuhteen muokkaamisen lisäksi ole yksiselitteistä ratkaisumenetelmää, sillä laakerivirroille on useita erilaisia syntymissyitä. Toiset ratkaisumenetelmät voivat jopa pahentaa tilannetta jos laakerivirtojen syy on ratkaisulle sopimaton.

Taajuusmuuttajat ovat merkittävin lisääntyneiden laakerivirtaongelmien lähde. Testien pohjalta havaittiin, että myös eri valmistajien taajuusmuuttajilla on eroja akselijännitteissä. Taajuusmuuttajien toimintaperiaate sekä kytkentätaajuus vaikuttavat akselijännitteiden tasoon. Uuden ja vanhan moottorityypin välille saatiin mittauksissa varsin merkittäviä eroja. Uudessa moottorissa akselijännitteet olivat huomattavasti vanhaa moottoria korkeammat. Myös uuden koneen kapasitanssiarvot olivat suurempia ja ne näyttivät kytkeytyvän pienemmällä taajuuksilla. Tämä saattaakin olla syy korkeampiin akselijännitteisiin. Moottorin sähköinen rakenne vaikuttaa sisäisiin kapasitansseihin.

AVAINSANAT: Laakerivirta, oikosulkumoottori, yhteismuotoinen jännite

UNIVERSITY OF VAASA**Faculty of technology**

Author: Arttu Hyvönen
Topic of the Thesis: Bearing currents in small squirrel cage motors
Supervisor: Timo Vekara
Instructor: Matti Fyhr
Inspector: Jere Kolehmainen
Degree: Master of Science in Technology
Major of Subject: Electrical Technology
Year of Entering the University: 2011
Year of Completing the Thesis: 2016

Pages: 73

ABSTRACT

Operation and life time of bearings affect the operation of the entire motor. Good and proper bearings extend the life time of the motor. In addition to the mechanical stress on bearings there is also the stress caused by the electrical current. The aim of this thesis is to find out bearing currents in small electric motors (less than 30 kW) and cures for their prevention. The number of bearing currents is significantly increased in so-called new motor models. For that reason on the basis of the tests and theory, this thesis seeks to define differences between the old and new model.

Alternating current induced by stator of the machine's internal common-mode voltage generates bearing currents. Common mode voltage is the sum of phase voltages at the time moment. Frequency converters unbalanced 3-phase voltage causes the oscillation in common mode voltage. High frequency bearing currents can be divided into circulating currents, grounding currents of the axle and capacitive discharge currents. Capacitive discharge currents are the most common in small motors.

Cabling implementation, type of cable, proper grounding and insulation of the bearing have a very important role in the prevention of bearing currents. Modification of motor structure and bearing voltage ratio is the best and the most durable solution against capacitive bearing currents. There is no explicit solution for bearing current problems because the number of different reasons how bearing currents emergence. Some solutions may even worse the situation if the solution does not fit with the reason of bearing currents.

Frequency converters are one of the main reasons for increased bearing current problem sources. On the basis of tests it was found that there are differences between frequency converters on the amount of shaft voltages. The operation principle and the switching frequency have an influence to shaft voltage. In measurements between the new and old motor rather significant differences were obtained. Shaft voltages in the new motor type were significantly higher than in the old motor. Also the new type capacitance values were higher and those seemed to exist at lower frequencies. This might be the reason for higher shaft voltages. The design of motor affect capacitances.

KEYWORDS: Bearing current, squirrel cage motor, common mode voltage

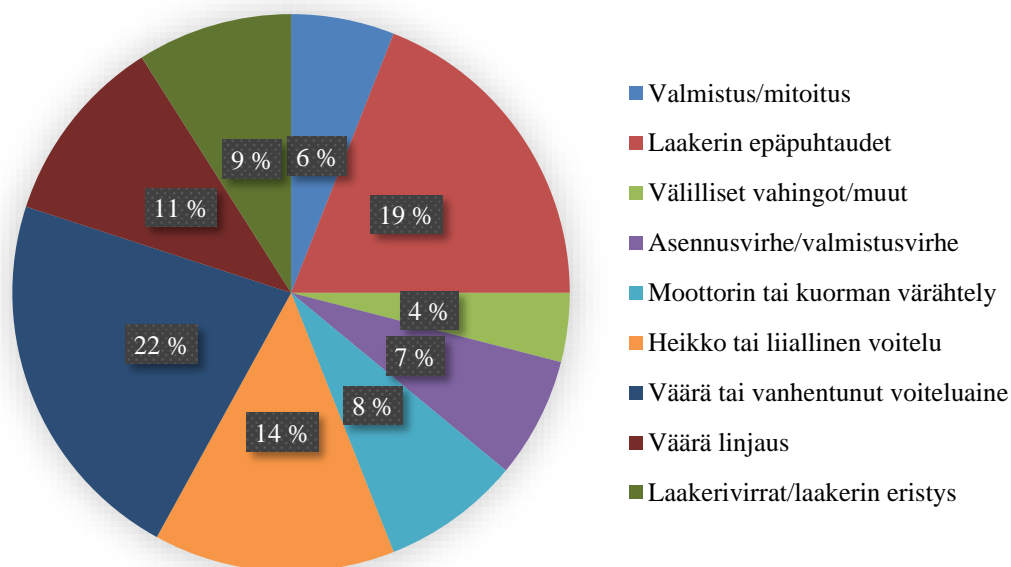
1 JOHDANTO

Laakerin toiminta ja käyttöikä vaikuttavat koko sähkömoottorin toimintaan. Oikein toimiva laakeri ei lyhennä koneen käyttöikää eikä sen vierintävastus juurikaan heikennä moottorin hyötysuhdetta. Heikentynyt laakeri nostaa vierintävastusta, jolloin koneen suorituskyky ja todennäköisesti myös käyttöikä heikentyvät merkittävästi. Laakeriin kohdistuu mekaanisen rasituksen lisäksi myös virrasta aiheutuva rasitus. Taulukossa 1 on eritelty koneen vikaantumisen aiheuttajia ja niiden todennäköisyyksiä.

Taulukko 1. Sähkömoottorin vikaantumisen syyt on jaoteltuna eri moottorimallien mukaan (Tavner 2008: 219).

Vuosi ja lähde	1985 (O'Donnell, 1985)	1986 (Allbrecht, 1986)	1995 (Thorsen, 1995)	1995–1997 (Tavner, 2008)	1999 (Tavner, 1999)
Sähkömoottorin tyyppi	>150 kW MV & HV moottorit	>75 kW MV & HV moottorit	>11 kW MV & HV moottorit	<150 kW LV moottorit ja generaattorit	<750 kW LV moottorit ja generaattorit
Laakerit	41 %	41 %	42 %	75 %	95 %
Staattori	37 %	36 %	13 %	9 %	2 %
Roottori	10 %	9 %	8 %	6 %	1 %
Muu	12 %	14 %	38 %	10 %	2 %

Kuten taulukosta 1 huomataan, varsinkin pienjännitekoneissa moottorin vikaantumisen suurin syy on laakerin vikaantuminen. Tästä johtuen laakerin toimintaa edistämällä pystytään vaikuttamaan koko koneen toiminta-arvoihin ja kestävyys. Laakerin vikaantumiselle on useita syitä, joita on eritelty todennäköisyyksien kanssa kuvassa 1.



Kuva 1. Laakerin vikaantumisen syyt ja osuudet yleisesti (Hoppler 2007: 223).

Laakerivirtaongelma on ollut esillä niin kauan, kuin sähkömoottoreita on valmistettu. Laakerivirrat syntyvät koneen epäsymmetrisen rakenteen aiheuttaman yhteismuotoisen jännitteen seurauksena. Indusoitunut jännite purkautuu laakerikapasitanssin läpi virtapulsseina aiheuttaen hankaluuksia. Ensimmäinen kirjallinen selvitys aiheesta tehtiin Wienissä jo 1900-luvun alussa. Aikojen saatossa moottoreiden rakenne opittiin tekemään niin, että laakerivirtaongelma poistui. Taajuusmuuttajien tullessa markkinoille laakerivirtaongelma palasi. Myös ABB:n moottoreissa ja varsinkin paperikoneiden sähkökäytöissä on ollut ongelmia. Esimerkiksi professori Heikki Tuusa on tehnyt vuonna 1995 tutkimuksen UPM:n Jämsänkosken tehtailla laakerivirtaongelman selvittämiseksi. Silloisten mittausten pohjalta ongelmien syyksi todettiin taajuusmuuttajassa esiintyvät nopeat jännitteen muutokset. Tuolloin laakereiden eristäminen ei poistanut ongelmaa, vaan ratkaisuna käytettiin erityyppisiä suodattimia taajuusmuuttajan ja moottorin välillä (Jokinen 2009: 238–240).

Laakerivirran haitallisuus aiheutuu siitä, kun virta pääsee kulkemaan laakerin läpi aiheuttaen laakerissa niin kutsutun EDM-ilmiön (Electrical Discharge Machining) eli suomennettuna kipinätyöstön. Kipinätyöstöllä tarkoitetaan metallin sulamista ja siirtymistä vierintäpinnalta voiteluaineeseen. Tämä metallin sulaminen aiheuttaa laakerin vie-

rintäpinnalle pieniä mikrokraatereita, jotka keräävät lisää virtapulsseja aiheuttaen lopuksi kipinätyöstökuopan. Kyseinen ilmiö aiheuttaa laakerissa vaurioita jo hyvin lyhyessä ajassa. Kuvassa 2 nähdään laakerivirtojen aiheuttaman vaurion esimerkki.



Kuva 2. Laakerivirrat aiheuttavat säännöllisen pyykkilautakuvion ja vaurioittavat laakerin vierintäpintaa. Kuvassa vasemmalla sijaitsee laakerin sisäosa, keskellä ulko-osa ja oikealla vierintäkuulat pidikkeessään.

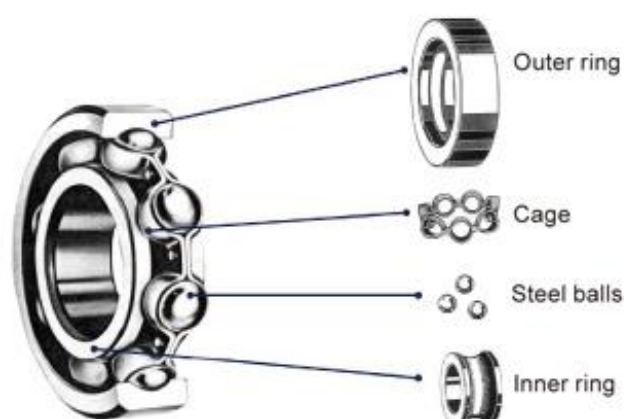
Sähkökoneissa esiintyvät laakerivirrat voidaan jakaa moniin luokkiin: kiertäviin ja ei-kiertäviin, johtuviin ja indusoituneihin, matalataajuisiin ja suuritaajuisiin. Koneen sisäiset kapasitanssit ovat niin pieniä nykyisillä moottorirakenteilla, että pienillä taajuuksilla impedanssit ovat suuria. Taajuusmuuttajien korkeat kytkentätaajuuudet luovat kuitenkin virralle pieniä impedansseja, jonka seurauksena suuritaajuiset laakerivirrat ovat yleistyneet. Suuritaajuiset laakerivirrat voidaan jakaa kiertäviin laakerivirtoihin, akselin maadoitusvirtoihin ja kapasitiivisiin purkausvirtoihin. Työssäni näistä kolmesta kaikkein kiinnostavin on kapasitiivinen purkausvirta, sillä se on yleisin pienissä vaihtovirtakoneissa. Laakerivirran aiheuttamia haittoja pyritään vähentämään katkaisemalla virran kulkureitti eristyksen avulla tai suunnittelemalla maadoitus niin, ettei haitallinen virta pääse kulkemaan laakerin läpi. Ongelmaan on olemassa jo useita ratkaisuja, joihin pureudutaan työssä tarkemmin.

Työssä suoritetaan myös akselijännitteiden mittaukset kahdelle moottorille kolmella eri taajuusmuuttajalla. Mittauksien pohjalta halutaan selvittää onko uusissa moottorityypeissä akselijännitteet korkeampia kuin vanhemmissa malleissa. Jos akselijännitteet ovat korkeampia, pohditaan syitä tähän kehitykseen.

Luvussa 2 on käsitelty laakerivirtojen syntymistä sähkökoneessa ja erilaisia virtatyyppejä. Virtatyypit on jaoteltu erikseen ja niiden vaikutusta laakerin toimintaan on arvioitu yksityiskohtaisesti. Kun tiedetään laakerivirtojen syntymisen perusta, voidaan sen estämiseksi ja rajoittamiseksi tehdä toimenpiteitä. Kolmannessa luvussa keskitytään jo olemassa oleviin ratkaisuihin ja pyritään yksityiskohtaisesti arvioimaan niiden hyötynäkökulmia. Tässä luvussa pyritään myös selvittämään eri ratkaisujen sopimista yhteen. Luvussa 4 on esitelty mittausten tuloksia ja pohdittu niiden merkitystä. Viimeisessä luvussa esitetään johtopäätökset.

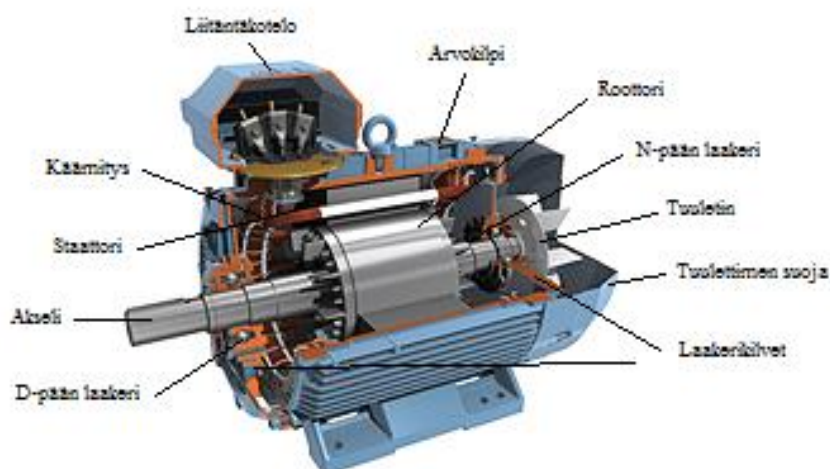
2 LAAKERIVIRRRAT SÄHKÖMOOTTOREISSA

Laakeri voidaan rakenteellisesti jakaa kuvasta 3 nähtäviin osiin. Laakeri koostuu ulkokehästä, sisäkehästä, molempien kehien vierintäpinoista, itse pyörivästä kuulasta tai muuntyyppisestä vierijästä ja laakerin voiteluaineesta.



Kuva 3. Laakerin rakenne käsittää ulomman ja sisemmän vierintäpinnan, itse vierivän elementin ja voiteluaineen (NMB).

Laakerin sisäkehä on kiinnitetty akseliin ja ulkokehä laakerikilpeen, jolloin roottori sekä akseli ovat laakereiden varassa. Itse laakerikilpi on kiinnitetty runkoon. Oikosulkumoottorin rakenne on nähtävissä kuvasta 4.



Kuva 4. Oikosulkumoottorin leikkaus (ABB 2009).

2.1 Moottorin sähköinen rakenne

Induktiokoneessa energia siirtyy roottoriin yksinomaan magneettikentän välityksellä ilman galvaanista yhteyttä. Staattorin käämityksellä indusoidaan jännite roottorin sauvoihin induktiolain mukaan

$$e = \frac{d\Phi_{t,x}}{dt,x} = \Phi_t \frac{d\phi_x}{dx} + \phi_x \frac{d\Phi_t}{dt}, \quad (1)$$

missä e on lähdejännite ja Φ magneettivuo. Epätahtikoneen toiminta perustuu roottorivirtaan, joka muodostuu yhdistämällä roottorikäämitys ulkoiseen kuormitukseen tai oikosulkemalla se sisäisesti. Roottorivirran ja staattorikentän välille syntyy tällöin voimavaikutus, joka pyrkii saamaan roottorin liikkeelle (Hietalahti 2011: 60).

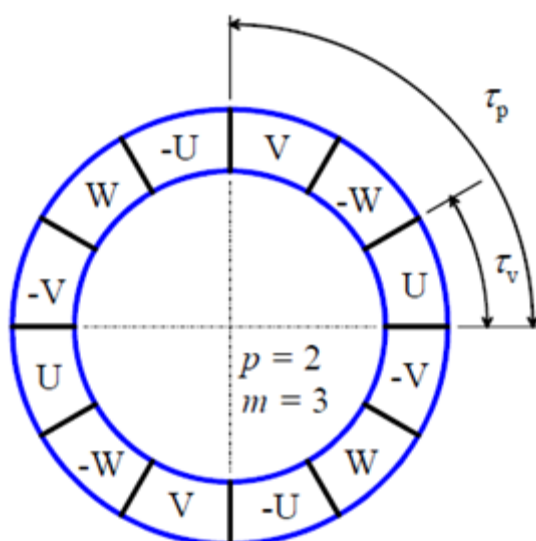
Staattorikäämityksessä käytetään emaloitua kuparilankaa tai vaihtoehtoisesti muotokäämitystä. Uran pohjalle tulee uraeriste ja päälle johdinnippu. Jos käytetään limikäämitystä, vaiheiden väliin sijoitetaan vaiheväliriste ja päälle urakiila. Esimerkin uran rakenteesta näemme kuvasta 5 (ABB 2014b).



Kuva 5. Staattorikäämityksen uraeristyksen rakenne (ABB 2014b).

Langalla uran täyterroin saadaan 0,6–0,7 välille, koska uraeristeet vaativat tilaa. Lisäksi pyöreillä langoilla ilmaa jää aina lankojen väliin.

Staattorin monivaiheisen urakäämityksen vaiheluku voi periaatteessa olla mikä tahansa, mutta nykyaikaisen kolmivaiheisen jakeluverkon takia, myös moottorit tehdään yleisesti kolmivaiheisiksi. Symmetrisessä monivaihekäämityksessä ilmavälikehä jaetaan tasan kaikille navoille siten, että saadaan aikaiseksi napajako, joka sähköisenä kulmana vastaa 180 astetta. Kuvassa 6 on esitetty 4-napaisen kolmivaihestaattorin käämitys (Pyrhönen 1995: 40–41).



Kuva 6. Kolmivaiheinen nelinapainen staattorikäämitys ja sen kehän vyöhykejako. Napajako on τ_p ja vyöhykejako τ_v (Pyrhönen 1995: 41).

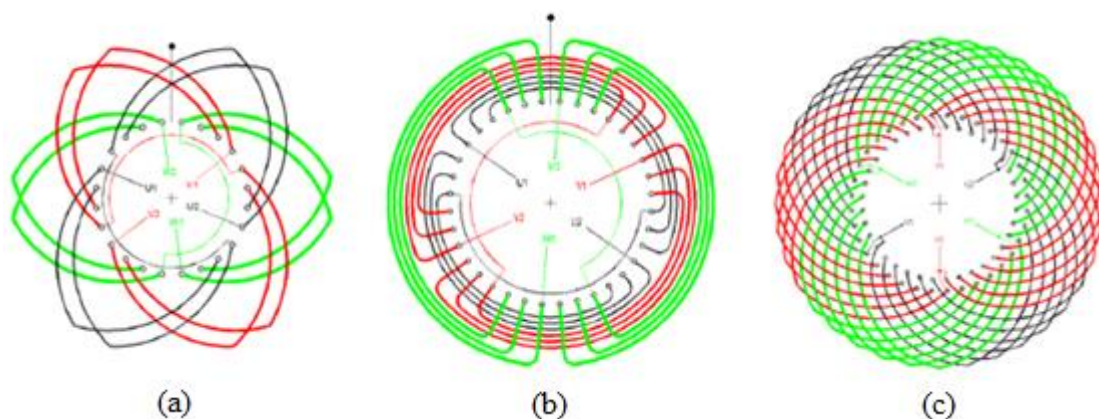
Vyöhykkeitä muodostuu $2 \cdot p \cdot m_v$ kappaletta, kuten myös kuvasta nähdään. Yhden vyöhykkeen uraluvun ilmoittaa vakoluku q , joka voidaan laskea yhtälöstä

$$q = \frac{Q}{2pm_v}, \quad (2)$$

missä Q on koko staattorin tai roottorin uraluku, p napapariluku ja m_v vaiheluku (Pyrhönen 1995: 40–41).

Vaiheet U, V ja W asettuvat kolmivaiheisessa järjestelmässä 120 asteen välein. Näin ollen nelinapaisessa staattorissa on sähköasteita yhteensä $2 \cdot 360$ astetta. Itse kääminnässä kuvan 4 positiiviset ja negatiiviset vaihemerkinnät kuvaavat virran suuntia. U ja -U tarkoittavat esimerkiksi yhden vaiheen positiivista ja negatiivista virransuuntaa urassa

nollapotentiaaliin verrattuna. Itse vaiheet voidaan käämiä usealla eri tavalla uriin. Kuvassa 7 on esitetty kolme esimerkkiä, kuinka vaiheiden käämitys voidaan luoda (Pyrhönen 1995: 40 - 41).



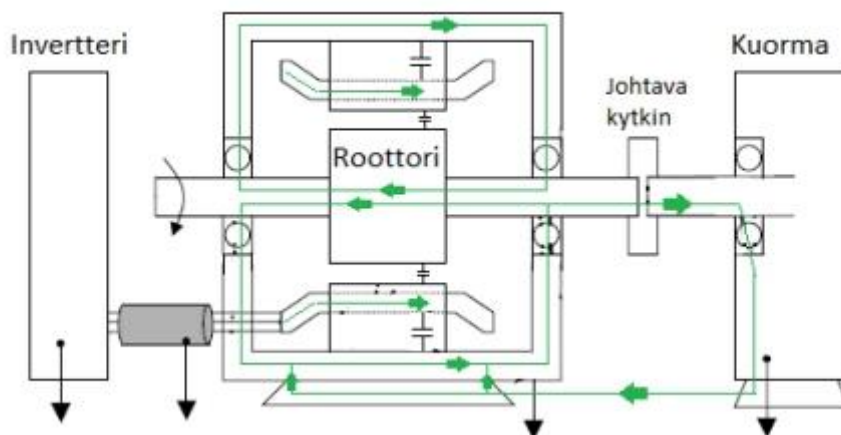
Kuva 7. Staattorin käämiä, jaettu vakiovyhtiristikäämi (a), konsentrinen kolmitasokäämitys (b) ja jänteistetty kaksikerroslimikäämi (c) (Kolehmainen 2013).

2.2 Suuritaajuisten laakerivirtojen syntyminen

Laakerivirtoja synnyttää kyseinen staattorin sähkökenttä, joka indusoi jännitteen laakerin yli. Suuritaajuisia laakerivirtoja voi syntyä kolmella eri tavalla, jotka on esitelty seuraavissa luvuissa. Muodostumistapa riippuu moottorin rungon koosta sekä moottorin rungon ja akselin välisestä maadoituksesta. Kaapeloinnin toteutustavalla, kaapelityypillä, kunnollisella maadoituksella sekä laakerin eristyksellä on hyvin tärkeä merkitys laakerivirtojen ehkäisyssä. Näillä toimenpiteillä virran kulkureitti pystytään katkaisemaan tai ohjaamaan vähemmän haitallista reittiä pitkin maahan. Vaihtovirtakäytön tehokomponenttien du/dt -arvo ja tasajännitevälipiirin jännite vaikuttavat myös laakerivirtojen määrään (ABB Oy 2000: 6).

2.2.1 Kiertävä virta

Suurissa moottoreissa staattoria kiertävä suuritaajuinen vuo indusoi suuritaajuisen vuon myös moottorin akselipäiden välille. Tämän kaltaisen suuritaajuisen vuon aiheuttaa staattorin käämityksestä runkoon vuotavan kapasitiivisen vuotovirran epäsymmetria. Jos akselin päiden välille indusoitunut jännite on riittävän suuri, kumoaa se öljykalvon impedanssin, jolloin vuota staattorissa kompensoiva virta alkaa virrata akselin, laakerien ja rungon muodostamassa virtapiirissä kuvan 8 mukaisesti. Seurauksena on kiertävä suuritaajuinen laakerivirta (ABB Oy 2000: 6).



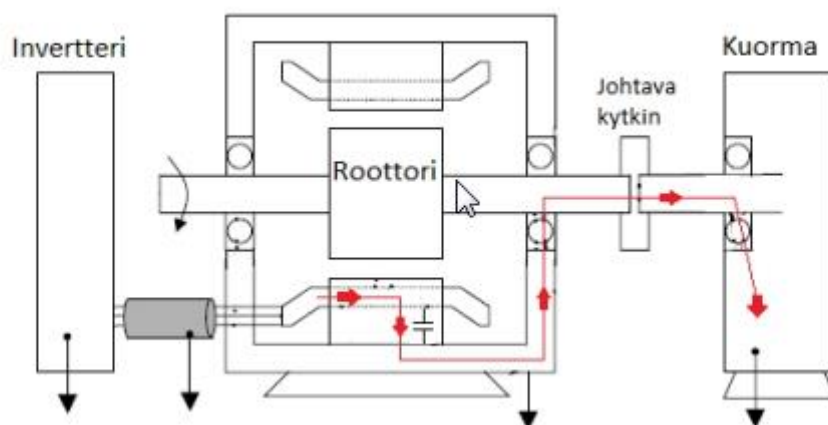
Kuva 8. Suuritaajuinen staattoria kiertävän vuon indusoiman jännitteen aiheuttaman laakerivirran reitti moottorissa (Schiferl, Melfi, Wang 2002).

Kuten kuvasta 8 huomataan, voi kiertävä laakerivirta muodostua myös kuormakoneen kautta, ellei käytössä ole eristävää kytkintä. Eristävää kytkintä käytettäessä pystytään suojaamaan kuormakoneen laakerit, mutta ongelmaa se ei poista käytettävästä moottorista.

2.2.2 Akselin maadoitusvirta

Staattorista runkoon vuotavan virran on palattava takaisin vaihtosuuntaajaan, joka on moottorin tehonlähde. Kaikki paluureitit sisältävät impedanssia, jonka seurauksena moottorin jännite kasvaa tehonlähteen maahan verrattuna. Jos tässä tapauksessa akseli on maadoitettu suoraan tehonlähteeseen, näkyy moottorin rungon jännitteen kasvu myös laakereissa. Jännite-eron kasvaessa tarpeeksi suureksi, voi se ylittää öljykalvon impedanssin, jolloin todennäköisesti osa virrasta palaa takaisin vaihtosuuntaajaan akselin ja laakerin kautta kuvan 9 mukaisesti. Tällaista suuritaajuista laakerivirtaa kutsutaan akselin maadoitusvirraksi (ABB Oy 2000: 6).

Moottorin rungon ja vaihtosuuntaajan välille voi syntyä jopa 100 V jännite-ero, jos virtatien induktanssi on tarpeeksi suuri ja reaktanssin arvo tyypillisen yhteismuotoisen virran taajuusasteikon yläpäässä (50 kHz – 1 MHz). Jos käytettävä laite on maadoitettu lähelle samaa potentiaalia vaihtosuuntaajan rungon kanssa ja moottorin akselista on metallinen kytkentä vaihdelaatikkoon tai muuhun käytettävään laitteeseen, on mahdollista, että osa yhteismuotoisesta virrasta kulkee laakereiden, akselin ja käytettävän laitteen kautta takaisin vaihtosuuntaajaan (ABB Oy 2000: 10).



Kuva 9. Staattorista vuotava virta palaa tehonlähteelle akselin ja laakerin kautta (Schiferl, Melfi, Wang 2002).

2.2.3 Kapasitiivinen purkausvirta

Kappaleessa syntyy aina kapasitanssia, kun kaksi johdinta erotetaan eristeellä toisistaan. Esimerkiksi moottorin käämityksellä, joka on eristetty rungosta emalipäällysteellä ja uraeristyksellä, on kapasitanssiarvo koneen runkoon nähden. Kapasitanssit moottorin sisällä ovat pieniä, joten impedanssi on suuri pienillä taajuuksilla ja estää siten pienitaajuiset hajavirrat. Nykyisten tehonlähteiden nopeasti nousevat pulssit sisältävät kuitenkin suuria taajuuksia, jolloin pienetkin kapasitanssit moottorin sisällä tuottavat pieni-impedanssisen reitin virralle (ABB Oy 2000: 9). Kyseinen teoria on nähtävissä kapasitiivisen ja induktiivisen reaktanssin laskukaavoista

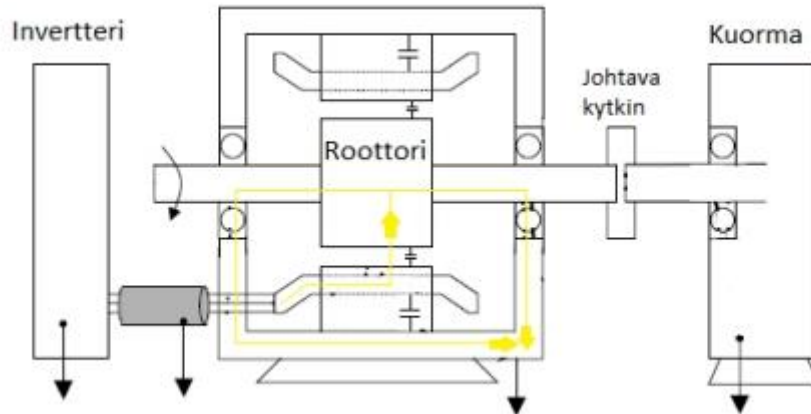
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (3)$$

ja

$$X_L = 2\pi f L, \quad (4)$$

missä X_C on kapasitiivinen reaktanssi, X_L on induktiivinen reaktanssi, f on taajuus, C on kapasitanssi ja L on induktanssi.

Pienissä moottoreissa yhteismuotoisen jännitteen sisäinen jakauma moottorin sisäisissä hajakapasitansseissa voi aiheuttaa niin suuria akselijännitteitä, että niiden seurauksena voi aiheutua suuritaajuisia laakerivirtapulsseja. Näin voi tapahtua erityisesti silloin, kun akselia ei ole maadoitettu käytettävän laitteen kautta, vaikka moottorin runko olisi suojattu maadoituksella normaalisti. Akselin ja rungon jännite-eron kasvaessa tarpeeksi suureksi, palaa osa virrasta laakerin kautta takaisin rungon maadoituspisteeseen kuormalta puuttuvan maadoituksen seurauksena. Kuormakoneen maadoituksella ongelma kuitenkin vain siirretään sen laakereihin, ellei käytössä ole eristävää kytkintä. Kyseinen laakerivirran kulku on nähtävissä kuvasta 10 (ABB Oy 2000: 6).



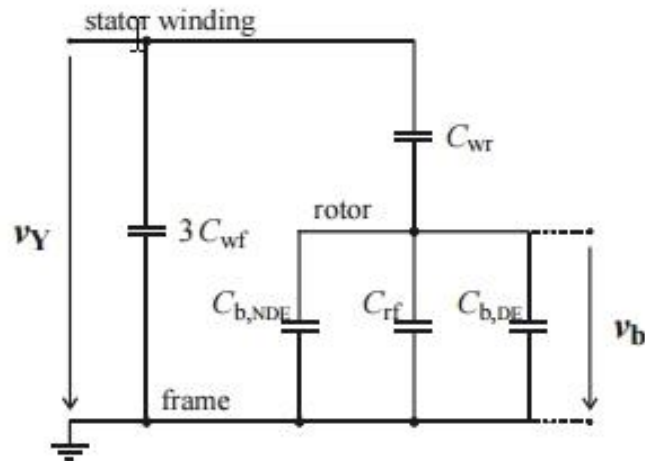
Kuva 10. Kapasitiivisen purkausvirran reitti kulkee laakereiden kautta maahan (Schiferl, Melfi, Wang 2002).

Työssä tutkitaan pienten sähkömoottorien laakerivirtoja sekä niiden ehkäisyyn tarkoitettuja keinoja. Kapasitiivinen purkausvirta on yleisin laakerivirran muoto pienissä koneissa, joten työn lopputuloksen kannalta on tärkeää keskittyä sen luonteeseen.

Kuvassa 11 on esitetty induktiokoneen hajakapasitanssien sijaiskytkentä korkeilla taajuuksilla. Laakeriin kytkeytyvää kapasitiivista jännitettä voidaan ennustaa, kun tunnetaan sähkökoneen laakerijännitesuhde eli Bearing Voltage Ratio. Laakerijännitesuhteella kuvataan koneen yhteismuotoisen jännitteen ja akselijännitteen välistä suhdetta, jolloin pystytään selvittämään yhteismuotoisen jännitteen vaikutus akselijännitteen heilaheluihin. BVR on koneelle ominainen arvo, joten sen pitäisi pysyä suhteellisen vakiona taajuusmuuttajasta tai taajuudesta riippumatta. Laakerijännitesuhde voidaan laskea kaavalla

$$BVR = \frac{U_{\text{laakeri}}}{U_{\text{cm}}} = \frac{C_{wr}}{C_{wr} + C_{rf} + 2C_b}, \quad (5)$$

missä U_{laakeri} on laakerin yli oleva jännite, U_{cm} yhteismuotoinen jännite, C_{wr} käämin ja roottorin välinen hajakapasitanssi, C_{rf} roottorin ja rungon välinen kapasitanssi ja C_b on laakerin kapasitanssi (Muetze 2004: 9). Kapasitiivisesti kytkeytyvän laakerivirran ehkäisyssä paras ratkaisu olisi keskittyä juuri kyseisen laakerijännitesuhteen pienentämiseen.



Kuva 11. Hajakapasitanssien sijaiskytkentä (Muetze 2004: 9).

Koneen rakenteita muokkaamalla pystytään minimoimaan akselijännitesuhde ja samalla akselijännitteet. Laakerijännitesuhteen avulla pystytään laskemaan akselijännite, kun tiedetään yhteismuotoisen jännitteen suuruus. Akselijännite lasketaan yhtälöstä

$$v_b = v_{com} \cdot BVR, \quad (6)$$

missä v_b on akselijännite, v_{com} on yhteismuotoinen jännite ja BVR on laakerijännitesuhde. Yhtälön mukaisesti testeissä voidaankin olettaa akselijännitteen olevan suoraan verrannollinen yhteismuotoisen jännitteen suuruuteen. Kapasitanssien perusteella voidaan olettaa, että koneen koon kasvaessa myös moottorin kapasitanssit kasvavat, sillä

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (7)$$

missä C on kapasitanssi, ε_r on eristeen suhteellinen permittiivisyys, ε_0 on tyhjiön permittiivisyys, A on levykondensaattorin pinta-ala ja d on eristeen paksuus.

Standardissa PSK 7708 on määritelty kokemusperäisiä raja-arvoja vuotovirran tehollis- sekä huippuarvoille. Laakerivirralla ei ole merkittäviä vaikutuksia laakerin käyttöikään, jos tehollisarvo pysyy alle 20 mA ja huippuarvo alle 1 A. Vaikutus laakerin käyttöikään on merkittävä arvojen ylittäessä 50 mA tehollisarvon tai 2 A huippuarvon. Näiden välillä laakerivirrat saattavat aiheuttaa vaikutuksia käyttöikään (PSK 7708: 2004).

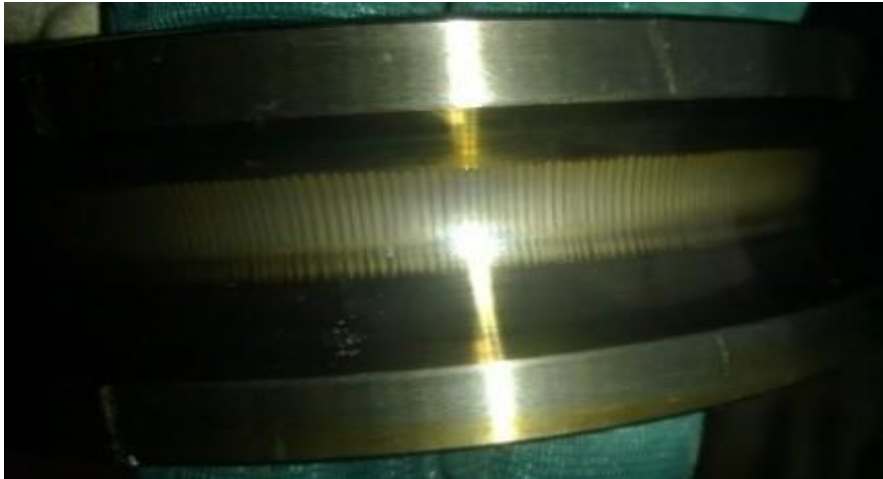
2.3 Laakerin vauriot

Laakerivaurio on tunnistettavissa laakerin epänormaalista käyttäytymisestä. Tällaista epänormaalia käytöstä ovat laakerin värinä, laakerista kuuluva ääni, kova kuumeneminen ja epänormaali vierintävastus. Laakerin värinään yleisiä syitä voivat olla kuoriutuma, ruostuminen, epätasapaino tai liian suuri vällys. Ääni voi taas johtua laakerin vierintäpintojen vauriosta, ahtaudesta, ruosteesta tai huonosta voitelusta. Kuumenemistä aiheuttaa helpoiten heikko voiteluaine, joka on myös yleisin syy pidikkeen vääntymisen ohella epänormaaliin vierintävastukseen. Laakerivirrat saattavat tavalla tai toisella liittyä kaikkiin näistä ongelmista. Yleisesti laakerivirta vaikuttaa sekä itse laakeriin että voiteluaineeseen, jolloin vaurioituneen laakerin oireet saattavat olla monenlaisia (Lappeenrannan Laakerikeskus Oy).

Laakerivirta aiheuttaa laakerin vierintäpinnan sähköistä syöpymistä, jolloin sen pintaan sulaa pieniä kuoppia. Sulanut metalli jää voiteluaineeseen ja näin ollen heikentää laakerin toimintaa entisestään. Voiteluaineen metallihiukkaset heikentävät rasvan läpilyöntikestoisuutta, jolloin laakerivirtapulsseja syntyy yhä enemmän. Mekaanisilta ominaisuuksiltaan metallihiukkasia sisältävä rasva ei myöskään toimi oikein, joten heikko voitelu itsessään aiheuttaa lisää kulumista (Muetze 2004).

Kun vierintäpinnalle on syntynyt tarpeeksi mikrokraatereita, kärsii laakerin vierintäelimen toiminta. Heikentynyt vieriminen aiheuttaa laakerin resonoimista. Resonanssi synnyttää vierintäpinnalle pyykkilautakuviota. Kyseinen kuvio ei aina aiheudu laakerivirroista, vaan myös mekaaninen värinä saattaa aiheuttaa kyseisen ilmiön (SKF 2001).

Laakeripesä voi myös harmaantua heikon voiteluaineen vaikutuksesta. Harmaantumista esiintyy, kun rasva menettää eristysominaisuuksiaan, jolloin laakeri voidaan olettaa reaktiiviseksi. Tällöin virrantiheydet ovat matalia, mutta ajan myötä laakerivirta syövyttää vierintäpinnan karheaksi. Kuvasta 12 nähdään kyseisen ilmiön aiheuttama vaurio (Kanninen 2011: 26).



Kuva 12. Laakerivirta on vaurioittanut kyseistä vierintäpintaa aiheuttamalla pyykkilautakuviota (ABB Oy).

Matalat virrantiheydet aiheuttavat harmaantumista vierintäpinnoille, joten kyseinen ilmiö voidaan nähdä myös itse vierintäelimissä. Kuvassa 13 on esitetty laakerivirran vaikutuksesta harmaantuneet laakerin kuulat.



Kuva 13. Laakerivirran harmaantuttamat laakerikuulat.

Laakerivirrat vaikuttavat suuresti myös voiteluaineen laatuun. Lämpilyönneissä syntyy hyvin korkeita lämpötiloja, jolloin rasvan pohjaöljy saattaa palaa tai hiiltä. Jos rasvan pohjaöljy on heikkolaatuista, ei vierintäpinnoille synny tarpeellista eristyskerrosta ja sen seurauksena laakerin vaurioituminen on todennäköistä (Kanninen 2011: 28).

3 LAAKERIVIRTOJEN EHKÄISYMETELEMÄT

Niin kauan kuin pienjännitteellä käytetään kaksitasoisia PWM-taajuusmuuttajia, yhteismuotoinen jännite tulee olemaan moottorivalmistajan riesana. Paras tapa moottorin kannalta olisi, että yhteismuotoinen jännite eliminoidaisiin jo taajuusmuuttajalla. Käytännössä tämä tuskin tulee lähiaikoina onnistumaan, joten moottorivalmistajan on vain sopeuduttava tilanteeseen. Paras tapa ratkaista laakerivirtaongelma olisikin minimoida moottorin laakerijännitesuhde rakenteellisesti, jolloin yhteismuotoisen jännitteen heilahdelliset eivät luo niin suuria akselijännitteitä.

Tässä luvussa käsitellään kolmenlaisia laakerivirtamuotoja: kiertävä laakerivirta, akselin maadoitusvirta ja kapasitiivinen purkausvirta. Jokaiselle laakerivirtamuodolle on omat ratkaisumenetelmänsä. Laakerivirran aiheuttamia vaurioita saatetaan jopa pahentaa, jos käytössä on väärä menetelmä kyseiselle virtamuodolle.

Laakerijännitesuhteen minimoimisen lisäksi on olemassa useita erilaisia tarkoitukseen kehitettyjä ratkaisuja. Ikävä kyllä, suuressa osassa niistä on merkittäviä koneen toimintaan tai hintaan vaikuttavia haittoja. Ratkaisuja voi olla myös hankala tai jopa mahdoton asentaa jälkikäteen. Tämän takia laakerivirran lähde on tiedettävä ennen toimenpiteitä, jotta osataan valita paras ratkaisu sen korjaamiseksi ja näin ehkäistä uusia haittavaikutuksia. Taulukossa 2 on listattuna erilaisia laakerivirtamuotoja ja ratkaisumenetelmien vaikutusta niihin.

Taulukko 2. Eri ratkaisujen vaikutus laakerivirtojen ehkäisyssä (Särkimäki 2009: 33).

Laakerivirtatyyppi / parannuskeino	Kapasitiivinen laakerivirta	Kiertävä laakerivirta	Akselin maadoitusvirta
Akselin maadoitusarja	Vaaditaan pieni impedanssi	Vaaditaan pieni impedanssi	Ongelma voi jopa pahentua
Eristetyt laakerit tai ke-raamiset kuu-lat/vierintäpinnat	Vaaditaan molempien laakereiden eristys sekä kuorman eristäminen	Toinen pää pitää eristää	Molemmat päät on eristettävä
Moottorin parempi maadoitus ja suojatut moottorikaapelit	Ei toimi	Ongelma voi jopa pahentua	Toimii
Taajuusmuuttajan suodatimet	Toimii, jos suodatin poistaa yhteismuotoista jännitettä	Toimii	Toimii
Eristävä kytkin kuorman ja koneen välillä	Toimii kuormakoneelle	Ei toimi, koska virta kiertää moottorin sisällä	Toimii
Faradayn häkki staattorin ja roottorin välillä	Toimii	Ei toimi	Toimii
Kytkeäntaajuuden pienentäminen	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa
CM-jännitettä optimoiva taajuusmuuttajan muokaus	Toimii, jos poistaa CM-jännitettä	Toimii, jos poistaa CM-jännitettä	Toimii, jos poistaa CM-jännitettä
Staattoriin asetettavat johtavat liuskat	Ei toimi	Toimii	Vaatii kunnollisen maadoituksen
Taajuusmuuttajan jännite-tasojen lisääminen	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa	Pienentää ongelmaa

Taulukosta 2 huomataan hyvin, että erilaiset ratkaisut vaikuttavat eri laakerivirtatyyppeihin eri tavalla. Paras tulos saavutetaankin yhdistelemällä erilaisia ratkaisuja, jolloin laakerivirrat pystytään estämään kokonaisvaltaisesti. Kuitenkin useassa tilanteessa erilaiset ratkaisuvaihtoehdot tulevat karsituksi pois joko taloudellisista syistä tai työn vaikeuden takia. Projektin lopputuloksen kannalta on huomattavan tärkeää tutkia laakerivirtaongelmien alkuperä ennen lopulliseen ratkaisuun päättymistä, jotta virhearvioilta ja lisäkustannuksilta vältytään.

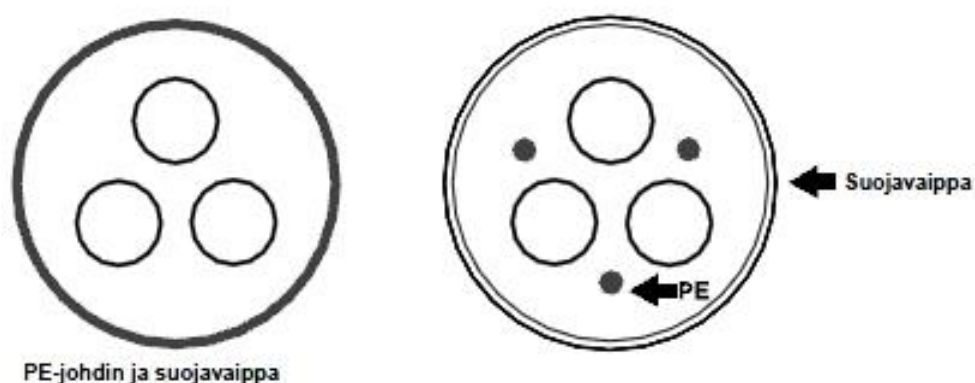
3.1 Suuritaajusten laakerivirtojen ehkäisy ja vahinkojen välttäminen

Suuritaajuisiin laakerivirtoihin voidaan periaatteessa vaikuttaa kolmella eri tavalla. Oikeanlainen kaapelointi- ja maadoitusjärjestelmä, laakerivirtapiirin katkaisu ja suuritaajuisen yhteismuotoisen laakerivirran vaimentaminen ovat ainoat toimivat tavat. Menetelmien tavoitteena on madaltaa laakerijännite niin alas, että se ei indusoi suuritaajuisia virtapulsseja laakeriin. Parhaat tulokset saavutetaan vaikuttamalla yhteismuotoisen jännitteen tasoon ja laakerijännitesuhteeseen koneen sähköistä rakennetta muokkaamalla. Seuraavissa kolmessa kappaleessa 3.1.1–3.1.3 on esitelty laakerivirtaongelmien perusratkaisuja, jotka pitäisi olla jokaisessa moottorissa kunnossa. Jos kuitenkin kyseisten ratkaisut eivät ole mahdollisia tai niillä ei saavuteta tarpeeksi suurta hyötyä, olen työssäni esitellyt kappaleessa 3.2 myös joitakin lisäratkaisuja ongelman poistamiseen. Kyseisissä lisäkeinoissa on kuitenkin kaikissa myös huonot puolensa joko hinnallisesti tai teknisesti.

3.1.1 Monijohdinkaapelit

Kolmivaiheisen koneen syötössä on käytettävä symmetrisiä monijohdinkaapeleita. Moottorikaapelin suojamaadoituksen on oltava symmetrinen, jotta käyttötaajuisia akselijännitteitä ei indusoituisi. Epäsymmetriset kaapelit aiheuttavat jännitteen indusoitumista vaihejohtimesta maajohtimeen, jolloin indusoitunut jännite aiheuttaa suoraan koneen runkoon potentiaalinen heilahteluja.

Kaapelin symmetrisyys saavutetaan, kun kolmen vaihejohtimen ja kolmen maajohtimen systeemissä johtimet on aseteltu kuvan 14 symmetrisellä rakenteella. Kaapelissa voidaan käyttää myös vain yhtä maajohdinta, jolloin symmetrisyyden kannalta se täytyy sijoittaa vaiheiden keskelle. Kaapeliin ulkopuolelta indusoitavat jännitteet voidaan poistaa tehokkaasti ympäröimällä vaihejohtimet johtavalla kuorella. Johtavana kuorena paras ratkaisu olisi käyttää joko alumiinia tai kuparia, jotta korkeille taajuuksille saadaan tarpeeksi matalaimpedanssinen reitti.



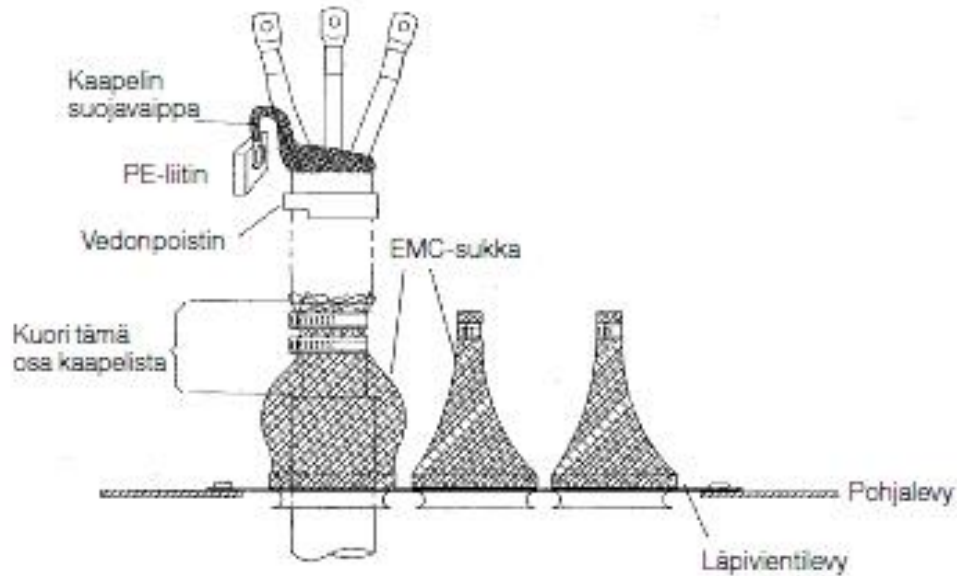
Kuva 14. Vasemmalla kaapeli, jossa vaiheet on maadoitettu johtavalla suojavaipalla ja oikealla maadoitus on toteutettu symmetrisesti kolmella maajohtimella (ABB Oy 2000: 15).

Johtavan päällysteen ja suojavaipan kytkenät laitteen runkoon tulee olla erittäin pieni-induktiivisia, jotta saadaan tehtyä tehokas suoja radiotaajuisia häiriöitä vastaan. Johtava kuori ja suojaus kytketään lopuksi mahdollisimman lyhyellä johtimella PE-kiskoon. Kyseisellä tavalla muodostetaan Faradayn häkki koko matkalle invertteriltä moottorille (Pyrhönen 2005–2006: 147).

3.1.2 Lyhyt impedanssireitti

Sähkökoneen syöttökaapeli tulisi olla mahdollisimman lyhyitä, jotta jännitteen heijastumisesta johtuvat ylijännitteet eivät nouse yli kaksinkertaisiksi. Kun käytetään lyhyitä kaapeleita ja 360 asteen liitostapaa kaapelin suojavaipalle, saadaan aikaiseksi yhteismuotoiselle virralle niin kutsuttu imuvirtamuuntaja. Imuvirtamuuntajalla yhteismuotoinen virta saadaan kulkemaan tehokkaasti takaisin suuntaajalle sähkökoneen sijasta. 360

asteen liitos syöttökaapeliin tulisi tehdä kuvan 15 osoittamalla tavalla (Kanninen 2011: 32–33).



Kuva 15. 360 asteen liitos eurooppalaisen tavan mukaan. Suojavaippa on liitetty PE-liittimeen mahdollisimman lyhyellä maadoituspunoksella. Kaapelin ulompi eristettä on poistettu, jotta EMC-sukan ja kaapelin suojavaipan välille saadaan 360 asteen liitos (ABB Oy 2000: 16).

Kaapeloinnin pituuksia harvoin pystytään lyhentämään, mutta jossain tapauksessa sopivilla ratkaisuilla koneen sijoittelu voi olla kyseiselle kohdalle edullinen. Kaapeloinnin pituuden kriittisenä arvona pidetään pituutta, jossa jännitteen yliaallot saadaan pidettyä alle kaksinkertaisina. Kriittistä pituutta L_{kr} voidaan arvioida yhtälöllä

$$L_{kr} = \frac{t_r v}{2} = \frac{t_r c}{2 \sqrt{\mu_r \epsilon_r}}, \quad (8)$$

missä t_r on jännitteen nousuaika, v on jännitepulssin etenemisnopeus, c on valon nopeus, ϵ_r on eristeen suhteellinen permittiivisyys ja μ_r on kaapelin eristeen suhteellinen permeabiliteetti.

3.1.3 Suuritaajuiset maadoituskytkennät

Suuritaajuisilla maadoituskytkennöillä tarkoitetaan lisämaadoituksia laitteen ja maatasojen välille potentiaalierojen tasaamiseksi. ABB:n teknisessä ohjeessa ohjeistetaan käyttämään 50–100 mm levyisiä kuparipunoksia, koska litteät johtimet tuottavat pieninduktanssisemmän reitin virralle kuin pyöreät johtimet. Lisämaadoitus on tarpeellista tehdä kohtiin, joissa epäillään olevan katkos vaihtosuuntaajan ja moottorin maatason välillä. Lisäksi voi olla tarpeellista oikosulkea moottorin ja käytettävän laitteen rungot ulkoisella potentiaalintasausjohtimella, jolloin vältetään laitteiden välisiltä potentiaalieroilta.

3.2 Muita laakerivirtojen ehkäisymenetelmiä

Laakerivirtojen ehkäisemisessä on useita muitakin ratkaisuja kuin edellä esitetyt. Suurin osa niistä keskittyy itse laakerin rakenteeseen, materiaaliin tai voiteluun, mutta tässä kappaleessa on myös käsitelty muutamia maadoituksen parantamiseen kohdennettuja ratkaisuja. Kyseisiin ratkaisuihin tulee päätyä vasta, kun edellisten kohtien toimenpiteet on suoritettu. Edelliset kolme laakerivirtojen ehkäisykeinoa (monijohdinkaapelit, lyhyt impedanssireitti ja suuritaajuiset maadoituskytkennät) ovat niin sanotusti perustoimenpiteitä, joilla pyritään ehkäisemään ja rajaamaan laakerivirtoja. Seuraavaksi esiteltävät ratkaisut ovat lisäkeinoja, kun koneen sähköistä rakennetta ei haluta tai pystytä muokkaamaan laakerivirtojen ehkäisyn näkökulmasta parempaan suuntaan.

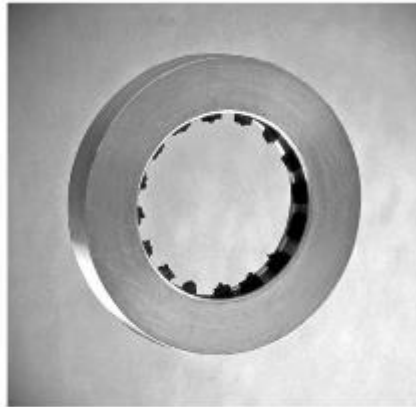
3.2.1 Akselin maadoitus

Hiiliharjojen ja maadoitusrenkaiden käyttö akselin maadoituksessa on hyvin tunnettu ratkaisu laakerivirtaongelmaan. Tässä menettelyssä akseli ja runko on yhdistetty harjan tai renkaan avulla yhteen, jolloin virralle muodostuu matalaimpedanssinen reitti maapotentiaaliin. Kun virralla on matalaimpedanssinen reitti akselista maahan, ei sen tarvitse kulkea laakerin läpi. Hiiliharjat ja maadoitusrenkaat ovat myös ratkaisuisista yksi halvimmissa ja niiden asentaminen jälkikäteen onnistuu suhteellisen helposti. Varsinkin

kapasitiivisissa laakerivirroissa tämä ratkaisu on hyvä, sillä akselin ja rungon välinen potentiaaliero pystytään pienentämään minimiin.

Hiiliharjan käytössä on kuitenkin myös useita sen toimintaa heikentäviä ongelmia. Ensimmäkin harja tulee asentaa mekaaniseen kontaktiin akselin kanssa, jolloin väistämättä syntyy kitkaa. Kitkan osuus on kuitenkin niin pieni, ettei sillä ole merkitystä koneen suoritusarvoihin. Toisaalta jatkuva kontakti aiheuttaa itse hiiliharjan suurta kulumista. Kontaktin lisäksi myös virran suuruus vaikuttaa harjan kulumiseen. Suuri virta lämmitteää hiiliharjaa huomattavasti, jolloin myös kulumisen kertaistuu. Harja saattaa myös kerätä epäpuhtauksia, jolloin sen toiminta heikkenee. Hapettuminen saattaa aiheuttaa ongelmia. Akselin suora maadoittaminen hiiliharjan avulla on teknisesti hyvä ratkaisu laakerivirtojen ehkäisyssä, mutta yleisesti se joudutaan asentamaan vasta jälkikäteen jolloin moottorin kustannukset nousevat. Kulumisen vuoksi myös huoltaminen on välttämätöntä, mistä seuraa lisää kustannuksia. Hiiliharja itsessään on halpa osa, mutta sen jälkiasentaminen saattaa aiheuttaa ennakkoluuloja (Oh 2008: 248–249). Hiiliharjojen hinnat vaihtelevat noin 20–60 \$ välillä akselin koosta ja harjan materiaalista ja muodosta riippuen.

Maadoitusrenkas on hiiliharjan vaihtoehto, jonka kulumisen ei ole läheskään yhtä suurta. Huollon tarve on siis huomattavasti pienempi. Maadoitusrenkaan toiminta on sama kuin hiiliharjalla, eli sen avulla pyritään luomaan matalaimpedanssinen reitti virralle laakerin sijasta. Maadoitusrenkaan sisäpinnalla käytetään kuluvan materiaalin sijasta mikrokuituja, jolloin saavutetaan kestävyydeltään ja toiminnaltaan parempi ratkaisu. Mikrokuidut kestävät kulutusta paremmin kuin hiili ja harjaa ympäröivällä renkaalla saadaan luotua korona-ilmio estämään veden ja epäpuhtauksien kertyminen. Maadoitusrenkaalla on siis useita hyviä puolia, mutta huonona puolena on sen hinta. Maadoitusrenkas on hinnaltaan moninkertainen hiiliharjaan verrattuna. Lisäksi maadoitusrenkaan teho ei ole aivan yhtä hyvä kuin hiiliharjan. Kuvassa 16 on esitetty maadoitusrenkas (Oh 2008: 248–249).



Kuva 16. Maadoitusrenkas, jonka sisäpinnalle on asetettu mikrokuituharja (Muetze 2008: 140).

Hinnaltaan maadoitusrenkaat ovat noin 90–700 \$ akselin halkaisijasta riippuen. Hintahaitari on todella suuri ja maadoitusrenkaita löytyy useita ominaisuuksiltaan hyvinkin erilaisia. Akselin maadoitusrenkas voidaan asentaa moottoriin jo valmistusvaiheessa. Kuvassa 17 on esitetty esimerkki koneen sisään asennetusta maadoitusrenkaasta.



Kuva 17. Maadoitusrenkas laakerivirtoja varten voidaan asentaa jo moottorin valmistusvaiheessa. Kuvassa on esitetty valmiiksi asennettu laakerin maadoitusrenkas (Oh 2008: 249).

Löytyneiden hintojen pohjalta voidaan todeta, että maadoitusrenkas on noin 5–10 kertaa kalliimpi ratkaisu kuin hiiliharja. Maadoitusrenkas on kuitenkin huomattavasti pitkäikäisempi ja teknisesti jopa parempi ratkaisu, joten ratkaisuna se ei välttämättä aina ole huonompi.

3.2.2 Hybridilaakerit

Hybridilaakeri eli toisin sanoen keraaminen laakeri on yksi vaihtoehto laakerivirtojen estämiseksi. Hybridilaakerissa käytetään keraamisia vierintäpintoja, jolloin kehien välinen kapasitanssi jää pieneksi. Hybridilaakereilla pystytään vaikuttamaan laakerin läpi vaikuttaviin kapasitiivisiin purkausvirtoihin. Rungon ja akselin välille muodostuvaa jännitettä pystytään rajaamaan kunnollisella akselin maadoituksella, jolloin virta pystyy palaamaan maapotentiaaliin laakerin sijasta muuta reittiä. Hybridilaakerilla jännite-eroa ei pystytä tasaamaan, mutta laakerin materiaalilla voidaan rajoittaa kapasitiivisia purkausvirtoja laakerin läpi. Hybridilaakerit käytännössä estävät laakerivirran muodostumisen eristävyytensä ja pienen kapasitanssinsa vuoksi. Periaatteessa laakerivirtaongelmaa ei tällä laakerityypillä edes synny, mutta akselijännite saattaa hybridilaakerin vuoksi purkautua toista reittiä pitkin. Hybridilaakereita käytettäessä onkin yleistä, että ongelma siirtyy kuormakoneisiin, ellei akselia ole eristetty kytkimen avulla (Oh 2008: 248).

Vaikka teknisiltä ominaisuuksiltaan tämänkaltainen laakeri olisi ideaali, niin siinä on myös edellisen esimerkin kaltaisten ongelmien lisäksi pieniä haittapuolia. Suurin ongelma lienee laakerityypin suuri hinta. Laakerin vaihto on aina työlästä, joten normaalin laakerin uusiminen vaurioitumisen seurauksena on myös hyvin kallista (Kanninen 2011: 34–35).

3.2.3 Laakerin eristys tai pinnoitus

Laakerin eristämällä tai vaihtoehtoisesti pinnoittamisella pyritään katkaisemaan laakerivirran reitti takaisin rungon maapotentiaaliin laakerin itsensä läpi. Laakerin eristämällä tarkoitetaan laakerin tai laakerikilven erottamista eristeellä akselistä, jolloin yhteismuotoinen akselin jännite ei teoriassa pääse purkautumaan rungon maapotentiaaliin. Eristäminen on samanlainen ratkaisu kuin hybridilaakeri, mutta tässä tapauksessa ”tavallinen” laakeri tai laakerikilpi pinnoitetaan eristeellä. Keinona laakerin eristäminen toimii varsinkin kiertävien virtojen ehkäisyssä. Pinnoituksella tarkoitetaan laakerin sisäpinnan, ulkopinnan tai laakerikilven sisäpinnan pinnoittamista eristeellä. Tällä eristeker-

roksella katkaistaan laakerivirran reitti laakerin läpi. Keraaminen pinnoite on yleisesti hyvin ohut, joten kapasitiivisten purkausvirtojen estämisessä pinnoitus ei ole paras ratkaisu. Eroosion vaikutuksesta ohut pinnoite saattaa vaurioitua ajan saatossa (Kanninen 2011: 36–38).

Laakerin pesäeristäminen on kallista ja sen toimivuus saattaa heikentyä ajan myötä. Laakerin niin sanotulla laminaattieristämällä ei tätä hintaongelmaa ole. Laminaattieristämällä tarkoitetaan akselin tai laakerikilven erottamista eristeellä laakerista. Tämän kaltaisen eristeen asennus on suhteellisen helppoa ja hinta ei ole este. Materiaalina laminaatti on valitettavan hyvä lämmöneriste, joten sen käyttö moottorin laakerivirtojen estämiseen saattaisi tuoda lämmönsiirron ongelmia (Kanninen 2011: 36–38).

3.2.4 Eristävä kytkin

Eristävällä kytkimellä pyritään estämään akselin maadoitusvirran kulku kuorman maadoituspisteeseen. Eristävällä kytkimellä tavoitellaan varsinkin kiertävien laakerivirtojen sekä akselin maadoitusvirtojen muodostumisen rajaamista. Akselin maadoitusvirta kulkee koneen rungosta laakerin läpi akseliin ja sieltä kuorman maadoituspisteeseen. Jos siis kuorman maadoituspiste luo akselin maadoitusvirralle matalaimpedanssisemmän reitin kuin koneen rungon maadoitus, on käytettävä eristävää kytkintä virran kulun katkaisemiseen. Kuvassa 18 on esitetty eristävä kytkin.



Kuva 18. Eristävä kytkin (Ahola 2011: 23).

Toisaalta jos ajatellaan asiaa kapasitiivisten purkausvirtojen kohdalta, niin eristävä kytkin saattaa jopa olla haitallinen. Käytettäessä eristävää kytkintä, akseliin muodostunut jännite ei pääse purkautumaan muuta reittiä kuin laakerin läpi. Eristävällä kytkimellä ehkäistään kuormakoneen laakereihin aiheutuva lisärasite ja estetään jännitteen purkautuminen sen laakereiden läpi.

3.2.5 Laakerin voitelu

Laakerin voitelulla pystytään vaikuttamaan laakerivirtojen kulkuun ja suuruuteen. Eristävällä rasvalla pyritään eristämään laakeri, ettei läpilyöntejä tapahdu. Eristävyyteen vaikuttaa suuresti koneen pyörimisnopeus. Moottorin pyöriessä hitaasti, jää vierintäelementtien ja vierintäpinnan välille ohut voiteluainekerros. Suuremmalla nopeudella on päinvastainen vaikutus. Toisaalta nopeuden nostaminen nostaa myös lämpötilaa, jolloin voiteluaine on notkeampaa. Notkeampi voiteluaine tarkoittaa ohuempaa kerrosta kuulan ja pinnan välillä (Oh 2008: 248).

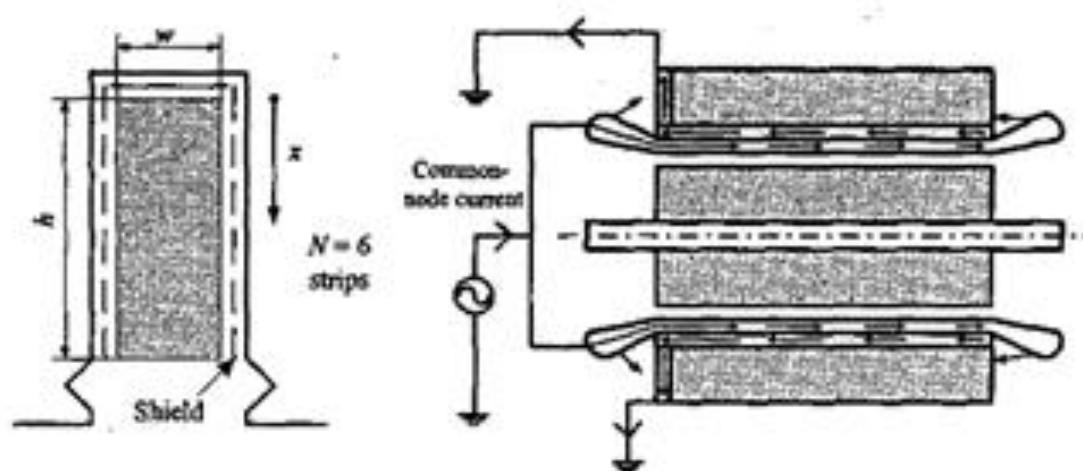
Eristävän rasvan lisäksi vaihtoehtona on myös johtavan voiteluaineen käyttö. Johtavan rasvan käyttö perustuu siihen, että akselijännitteen annetaan purkautua laakerin läpi, jolloin suuria pulssimaisia virtoja ei synny. Periaatteessa idea on hyvä, mutta tässä vaihtoehdossa rasvan käyttöikä heikkenee. Käytännössä kyseinen voiteluaine vaurioittaisi laakerit hyvin nopeasti (Kanninen 2011: 35; Oh 2008: 248).

Yleisesti laakerirasvan muuttamisella ei saavuteta niin suurta hyötyä, että se olisi suositeltavaa. Rasvat ovat yleisesti optimoitu niin, että niiden käyttöikä ja voiteluteho ovat parhaat mahdolliset. Jos tämän lisäksi vielä pyritään eristävään tai johtavaan rasvaan, on väistämättä heikennettävä jotain ominaisuutta. Kyseisen seikan vuoksi olisi kaikkein suositeltavinta käyttää muuta ratkaisua laakerivirtojen ehkäisyssä.

3.2.6 Sähköstaattinen suoja

Moottorin sähköstaattisella suojauksella pyritään estämään yhteismuotoisen jännitteen kapasitiivinen kytkeytyminen. Käytännössä tällä tarkoitetaan kaikkien kapasitiivisten kytkeytymisreittien suojaamista johtavalla materiaalilla. Paras lopputulos saadaan suojaamalla ilmapäli, staattoriurat sekä kääminpäät. Tärkeää on myös suojata kaikki kyseiset kohdat, ettei yhteismuotoinen virta pääse vuotamaan suojaamattomasta kohdasta.

Johtavat suojaukset liitetään yhteen ja maadoitetaan koneen maadoituspisteeseen. Tällä saadaan muodostettua kattava suojaus kapasitiivisesti purkautuvia virtoja vastaan. Vaikka tämä menetelmä on toimiva, niin sen heikkous on asennuksen hinta. Sähköstaattinen suoja on hyvin epäkäytännöllinen, asennus hankala ja se aiheuttaa koneessa ylimääräisiä häviöitä (Mäki-Ontto, Luomi 2003; Kanninen 2011).



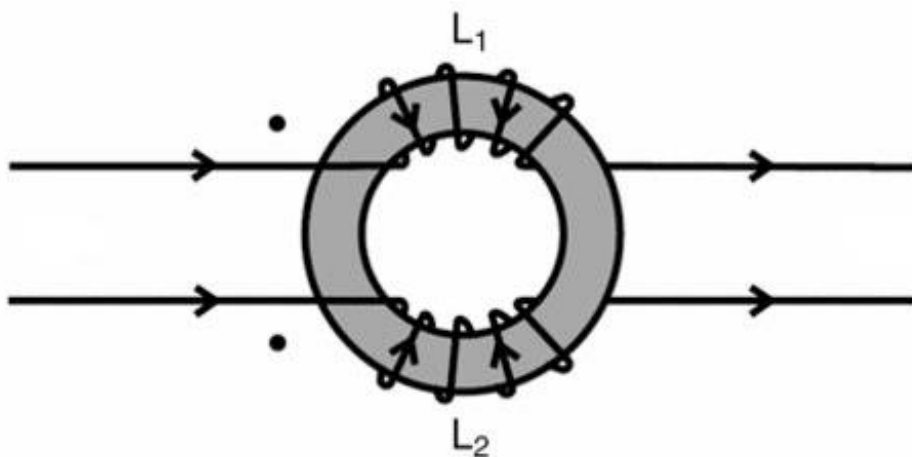
Kuva 19. Sähköstaattisen suojan toiminta. Kapasitiivisesti kytkeytyvät kohdat suojataan johtavalla materiaalilla ja kytketään maapotentiaaliin (Mäki-Ontto, Luomi 2003: 275).

Sähköstaattisella suojalla on lähteen mukaan saatu hyviä tuloksia laakerivirtojen ehkäisyssä, joten ideana kyseinen menetelmä voisi olla kehitystyön tuloksena käyttökelpoinen (Mäki-Ontto 2006).

3.2.7 Suodattimet

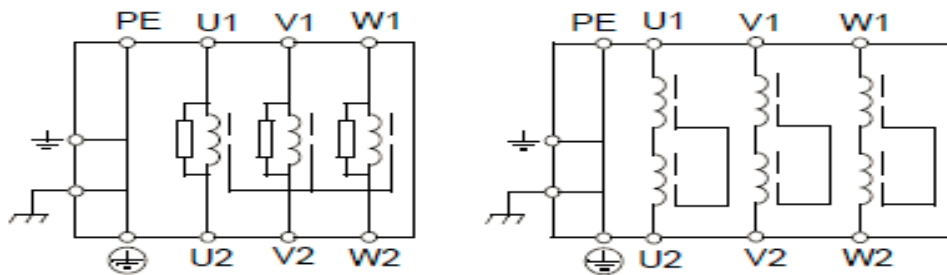
Akselijännitteiden tasoa pystytään pienentämään erilaisten suodattimien ja kuristimien avulla. Suodattimilla ja kuristimilla pyritään vaimentamaan moottorin yhteismuotoisen jännitteen muutosilmiöitä. Kuristimilla pyritään vaimentamaan hajakapasitanssien kautta kulkevan yhteismuotoisen virran huippuarvoa, virtapulssin jyrkkyyttä ja jälkivärähtelyä. Kuristimen avulla pudottamalla yhteismuotoisen virran muutosnopeus tai huippuarvo riittävän alas, saadaan akselijännitteet laskemaan riittävän alhaisiksi (Hammar 1997: 52–53).

Ensimmäinen suodintyyppi on common mode-suodin. Common mode -suodin on laakerivirtojen ehkäisyyn kehitetty suodin, jolla pyritään pienentämään yhteismuotoisen jännitteen du/dt -arvoa. Yleisimmin käytössä ovat ferriittirenkaat moottorikaapelin vaihejohtimien ympärille asennettuna. Ferriittirenkaan ideana on synnyttää renkaan läpi tuotujen johtimien välille magneettikenttä, joka synnyttää suuren impedanssin yhteismuotoiselle virralle. Maajohdinta ei saa tuoda renkaan läpi, jotta systeemi toimisi. Renkas voidaan siis ajatella lähtöön kytkettynä impedanssina, jonka arvo kasvaa taajuuden kasvaessa. Ferriittirenkaat ovat helposti asennettavia ja niiden hinta on edullinen. Kuussa 20 on esitetty ferriittirenkaan idea (Pekola 1998: 23–24, Niemi 2014: 48–50).



Kuva 20. Ferriittirenkaan toimintaperiaate. Ferromagneettisen renkaan läpi tuodut johtimet saavat aikaan magneettikentän renkaassa.

Du/dt-suodin on toinen vaihtoehto. Du/dt-suodin on alipäästösuodin, jonka avulla pyritään vähentämään nopeita jännitteen muutoksia moottorissa. Kyseinen suodatin hidastaa taajuusmuuttajalähdön nousevaa jännitepulssia niin, ettei jännitepulssi ehdi nousta liian korkeaksi ennen vaihtosuuntaajaan negatiivista heilahdusta. Yleisimmin käytetty du/dt-suodin koostuu kuristimista ja vastuksista. Nopeiden jännitemuutosten hidastamisella ehkäistään suurten akselijännitteiden muodostumista. Suodattimen kerrotaan myös alentavan moottorin käyntilämpötilaa. Suodattimen huonoja puolia ovat laitteen suuret häviöt, paino, koko, hinta ja rajoittavat koneen kuormitettavuutta sekä mahdollisesti myös lähtötaajuutta. Kuvassa 21 on kuvattu du/dt-suotimen toimintaperiaate (Niemi 2014: 45 - 46).

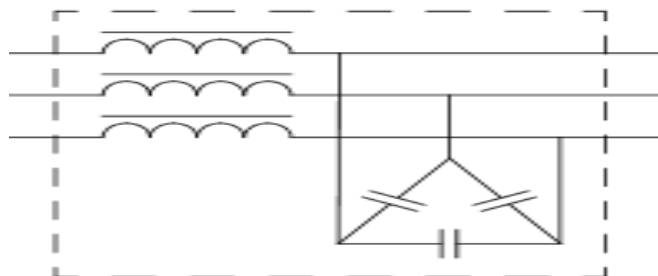


Kuva 21. Du/dt-suotimen toimintaperiaate. Suodin koostuu kuristimista sekä mahdollisista vastuksista (ABB drives Oy 2009: 22).

Du/dt suodattimesta on myös kehitetty aktiivinen versio, jossa suodatinta ohjataan taajuusmuuttajan tasajännitevälipiirin negatiivisella ohjausjännitteellä. Toimintaperiaate on muuten täysin sama kuin tavallisessa du/dt suodattimessa, mutta laitteen koko ja hinta ovat pienemmät (Ström 2009).

Viimeisenä suodatintyyppinä on jäljellä sinisuodin. Sinisuotimet ovat tehokkaimpia suodintyyppejä moottorin ylijännitesuojauksessa. Suodin asennetaan taajuusmuuttajan lähtöön ja sen tarkoituksena on päästää läpi vain perustaajuinen sinisignaali. Kyseinen alipäästösuodatin koostuu kuristimista ja kondensaattoreista. Sinisuodattimen resonansitaajuus täytyy mitoittaa syöttöjännitteen perustaajuuden ja taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden välille. Hyvät puolet ovat du/dt suodattimen kanssa samat eli se suojaa moottorin käämitystä ja laakereita sekä laskee koneen lämpötilaa. Heikkoina puolina

sillä on kallis hinta sekä suuret häviöt. Kuvasta 22 nähdään suotimen toimintaperiaate (Niemi 2014: 46–47).



Kuva 22. Sinisuotimen toimintaperiaate. Suodin koostuu keloista ja kondensaattoreista (Niemi 2014: 46–47).

4 MITTAUKSIEN TULOKSET

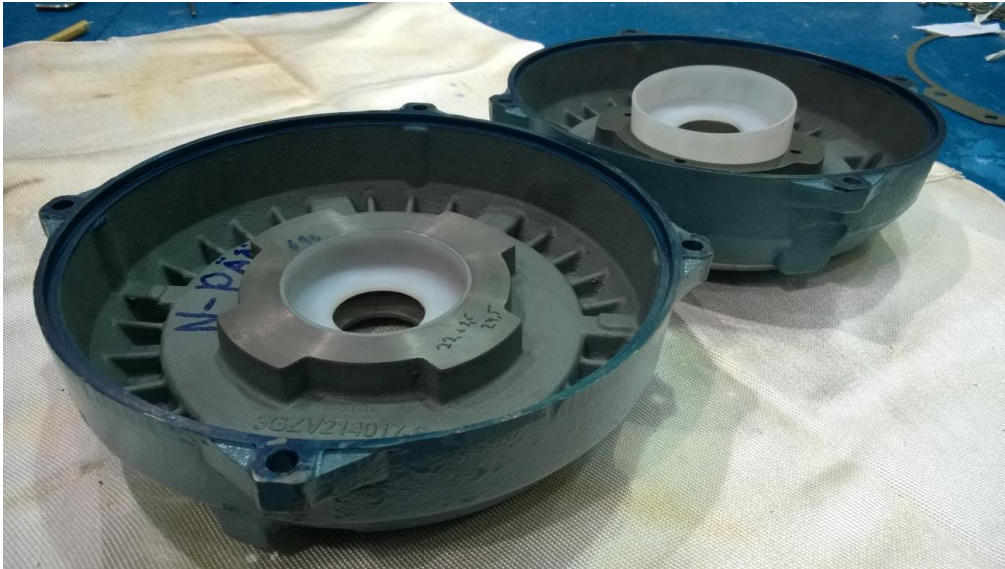
Aluksi voin todeta, että testien aloittaminen oli odotuksiani hankalampi urakka. Aikaa kului oikeanlaisten koneiden löytämiseen sekä useiden pienten lisätöiden tekoon. Iso kiitos kuuluukin ohjaajalleni Matti Fyhrille, joka teki suuren työn koneiden kanssa.

Testeissä pyrittiin yksinkertaisesti selvittämään eri moottorimalleihin syntyviä akselijännitteitä. Akselijännitteiden pohjalta voidaan päätellä syntyvien laakerivirtojen suuruuksia ja kehittää sopiva ratkaisumenetelmä. Testaamisessa perehdyttiin niin sanottujen ”vanhan mallin” mukaisiin koneisiin sekä uudempiin moottorimalleihin. Taajuusmuuttajan aiheuttamat laakerivirrat tunnetaan jo hyvin, mutta tässä testijaksossa pyrimme selvittämään koneen sähköisen rakenteen vaikutuksia laakerivirtojen suuruuteen ja haitallisuuteen. Samalla mittauksissa vertailtiin kolmen eri taajuusmuuttajan välisiä eroja akselijännitteiden suuruuksien osalta.

Mittauksissa molemmat laakerit eristettiin rungosta, jotta akselijännite saataisiin mitattua maapotentiaalia vasten. Kuvissa 23–24 on esitetty eristetty laakeri sekä kummatkin laakerikilvet laakerieristeiden kanssa.

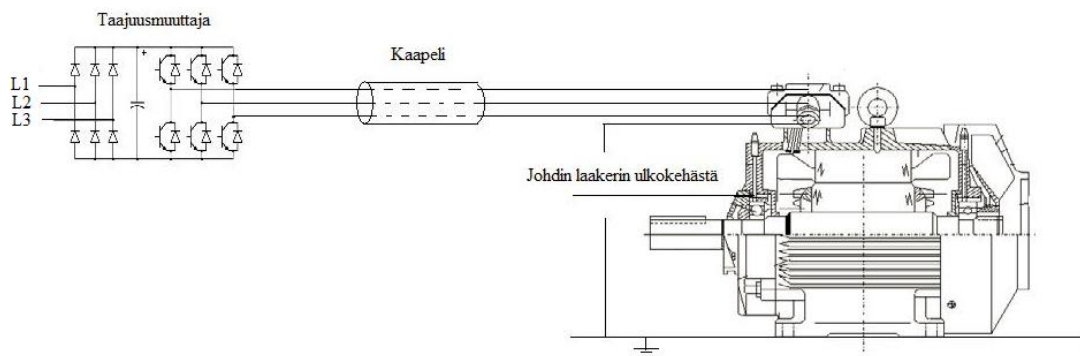


Kuva 23. Laakeri on eristetty laakerikilvestä nylonholkin avulla. Eristeen läpi tuotiin mittausanturin johto.



Kuva 24. Suuremman koneen laakerikilvet, joihin on asetettu laakerieriste.

Mittaukset suoritettiin kuvan 25 mukaisella kytkennällä. Akselijännite mitattiin laakerin ulkokehälle asennetusta johtimesta maapotentiaalia vasten. Yhteismuotoinen jännite ja vaihejännitteet mitattiin sen sijaan liitäntäkotelosta.



Kuva 25. Mittauskytkentä. Akselijännitteet mitataan laakerin ulkokehästä maapotentiaalia vasten. Yhteismuotoinen jännite ja vaihejännitteet mitattiin liitäntäkotelosta moottorin päältä.

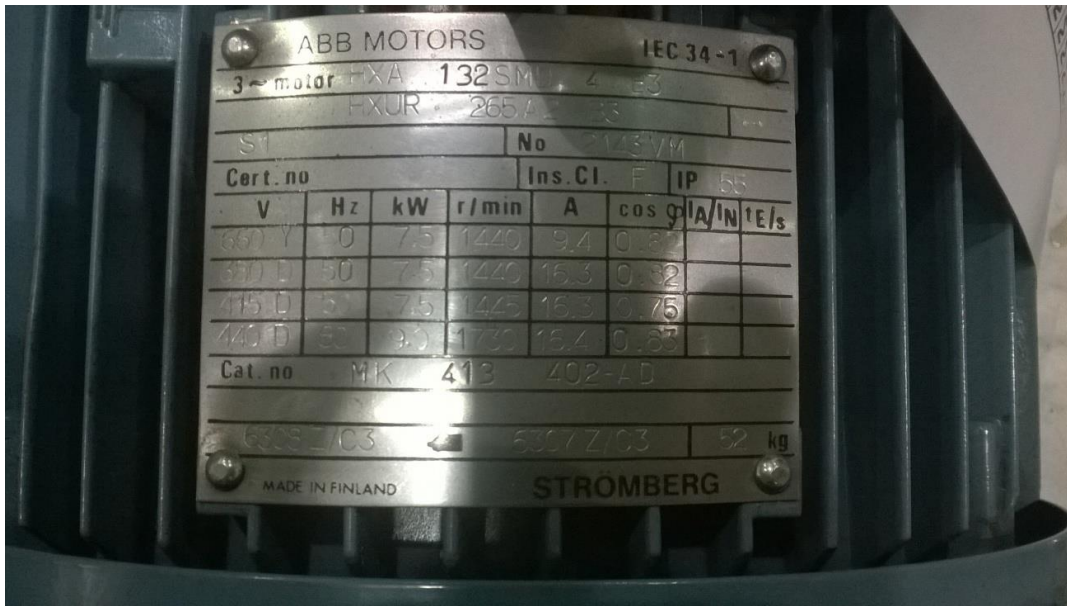
Syöttöverkko on kelluva eli syöttömuuntajan tähtipistettä ei ole maadoitettu, joten taajuusmuuttajista poistettiin EMC-suodattimet ennen mittauksia. Tällä ehkäistiin suodattimien aiheuttama heilahtelu maata vasten sekä tehtiin käyttöturvallinen ja ohjeistuksen mukainen asennus IT-verkkoon.

Testeissä oli käytössä kaksi eri moottoria. Ensimmäisenä mitattiin uudenmallin moottoria ja toisena koneena käytössä oli vanhempi Strömbergin aikainen moottori. Uutena koneena toimii alumiinirunkoinen M3AA 160MLB 4-napainen moottori, jonka kilpiarvot nähdään kuvasta 26. Staattorin uraluvuksi on laskelmassa ilmoitettu 36 ja johtimia urassa on 95. Tämän moottorin ilmaväliksi on ilmoitettu laskelmassa 0,55 mm.



Kuva 26. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin arvokilpi. Arvokilvestä nähdään koneen tyyppi, jännite ja kytkentä, taajuus, pyörimisnopeus, $\cos \phi$, virta, hyötysuhde ja käytetyt laakerit. Käytetyllä 400 V jännitteellä teho on 15 kW, pyörimisnopeus 1474 rpm, virta 27,8 A ja tehokerroin 0,84.

Toisena koneena käytössä oli alumiinirunkoinen HXA 132SMD 4-napainen moottori, jonka kilpiarvot nähdään kuvasta 27. Tälle moottorille staattorin uraluvuksi on laskelmassa ilmoitettu 36 ja johtimia urassa on 72. Tämän moottorin ilmaväliksi on ilmoitettu 0,4–0,45 mm.



Kuva 27. HXA 132SMD 4 moottorin arvokilpi. Arvokilvestä nähdään koneen tyyppi, jännite ja kytkentä, taajuus ja teho, pyörimisnopeus, virta, $\cos \varphi$, hyötysuhde ja käytetyt laakerit. Käytetyllä 380 V jännitteellä teho on 7,5 kW, pyörimisnopeus 1440 rpm, virta 9,4 A ja tehokerroin 0,82.

Koneet eivät ole täysin yhdenmukaiset, joten se täytyy huomioida tehtäessä työn pohdintoja ja päätelmiä. Tärkeimmät huomiot tulee keskittää tehon, jännitteen ja virran erilaisuuteen. Uuden ja isomman koneen teho on 15 kW kun taas vanhemman koneen teho on 7,5 kW. Tämän seurauksena myös moottorin virta I on pienempi sillä

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \varphi \cdot \eta}, \quad (9)$$

missä P on teho, U jännite, $\cos \varphi$ tehokerroin ja η hyötysuhde. Virran suuruus ei pitäisi merkittävästi vaikuttaa akselijännitteiden tasoon, sillä akselijännite pohjautuu koneen yhteismuotoisen jännitteen heilahteluihin. Kentänheikennyspisteenä käytettiin suuremmalla 400 V ja pienemmällä 380 V, vastaavien kilpiarvojen mukaan.

Laakerivirtojen testauksessa mitattiin moottorin akselijännitettä, josta voidaan päätellä haitallisten laakerivirtojen uhka. Mittaukset suoritettiin kahdella moottorilla, jotta vanhan ja uuden moottorityypin sähköisten rakenteiden laakerivirtaerot saataisiin esille. Testi on suoritettu myös kolmella eri taajuusmuuttajalla, jotta voidaan verrata taajuusmuuttajien vaikutusta akselijännitteisiin. Laitteiden parametrit olivat valmistajan

perusasetusten mukaiset, jotta vertailu taajuusmuuttajien välillä olisi pätevä. Käytetyt taajuusmuuttajat on nimetty taajuusmuuttajaksi 1, taajuusmuuttajaksi 2 ja taajuusmuuttajaksi 3. Taajuusmuuttajat 1 ja 2 ovat saman valmistajan samalla toimintaperiaatteella toimivia laitteita. Taajuusmuuttaja 3 on eri valmistajan laite, jonka toimintaperiaate on myös erilainen.

Tulokset luettiin oskilloskoopilta LeCroy wavewsurfer 44Xs. Mittaukset tehtiin 20 Hz, 50 Hz ja 60 Hz taajuuksilla. Arvot liipaistiin akselijännitteseen eli etsittiin akselijännitteen suurimpia arvoja 50 μ s ajalta, jotta pystyttiin selvittämään akselijännitteen suurin arvo. Oskilloskoopilla mitattiin myös pitkän ajan (20 s) mittaus, jolloin saatiin luotettavat tulokset RMS-arvoille.

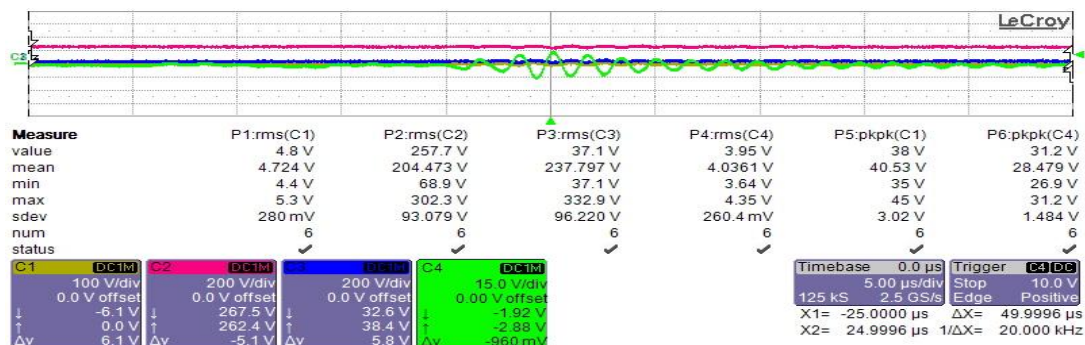
Jos akselijännitteet ovat uusissa koneissa huomattavasti korkeampia kuin vanhoissa koneissa, tulee pohtia erinäisiä syitä tähän ilmiöön. Tällöin voidaan myös olettaa, että sähköistä rakennetta on vuosien saatossa muokattu suuntaan, jossa laakerivirtoja esiintyy yhä enemmän. Tällaisia muutoksia voisivat olla esimerkiksi ilmapälin pienentäminen suhteessa pinta-alaan, eristevahvuuksien pienentäminen ja urageometrian muutokset. Näillä toimenpiteillä yleisesti pyritään suurentamaan koneen hyötysuhdetta mutta laakerivirtojen näkökulmasta ne saattavat olla erittäin haitallisia toimenpiteitä.

4.1 M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset

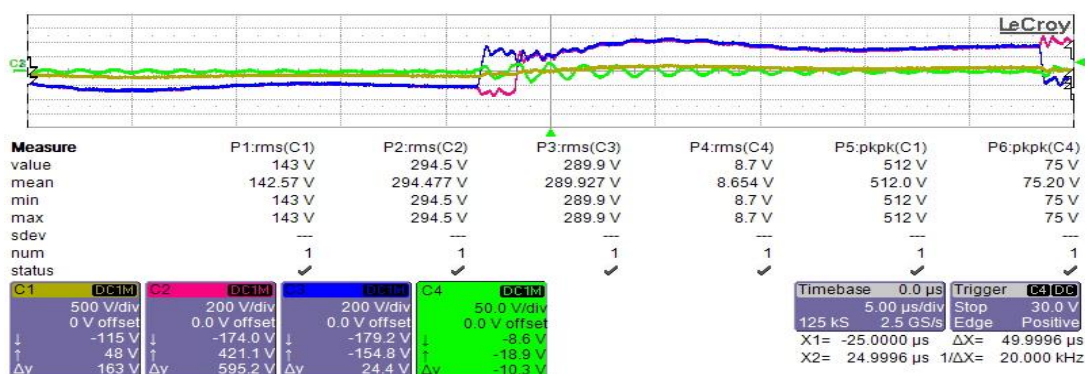
Mittaustulokset on esitetty kuvina kaikkien kolmen taajuusmuuttajan käytöistä jokaisella taajuudella. Mittauskuvien merkittävimmät tulokset löytyvät myös taulukosta 3 sekä kuvan 38 kaavioista, mutta jännitteiden syntyminen ja muoto selviävät vain kyseisistä kuvista.

Mittauskuvissa C1 kanavassa keltaisella värillä on piirretty yhteismuotoinen jännite. Kanavassa C2 punaisella on *U*-vaiheen jännite ja kanavassa C3 sinisellä *V*-vaiheen jännite. Liipaisukanavassa C4 on esitetty akselijännite vihreällä värillä. Kuvassa 28 on

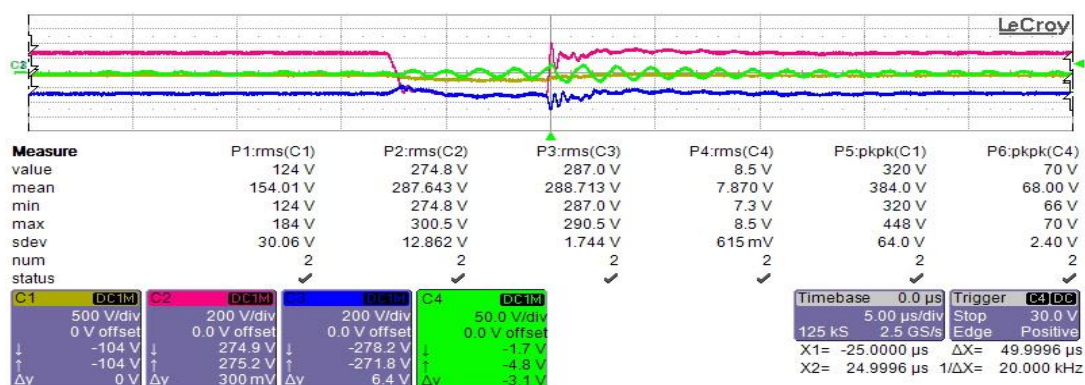
DOL-käytön mittaustulokset. Kuvissa 29–31 sen sijaan on 50 Hz mittaustulokset kaikilla taajuusmuuttajilla.



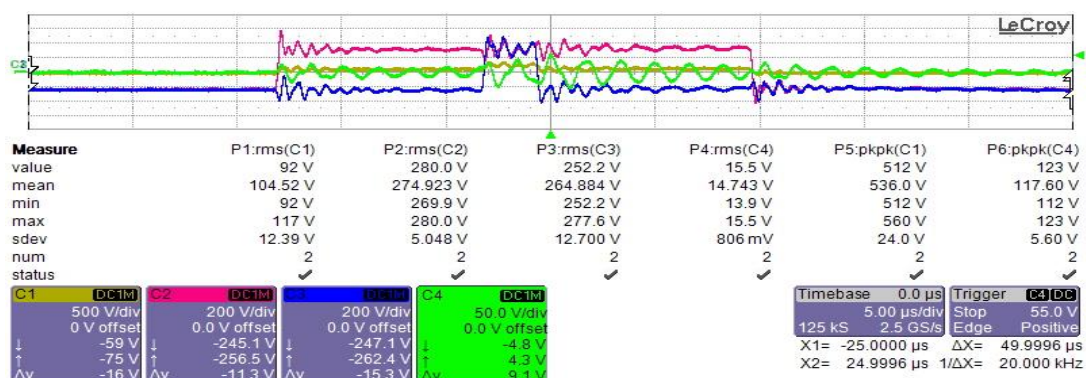
Kuva 28. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset DOL-käytössä. Jännitetasot ovat huomattavasti pienemmät taajuusmuuttajakäyttöihin verrattaessa.



Kuva 29. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 1 kanssa taajuudella 50 Hz. Liipaisulla on etsitty akselijännitteen suurin arvo. Kyt-kentätaajuutena on käytetty 3 kHz.

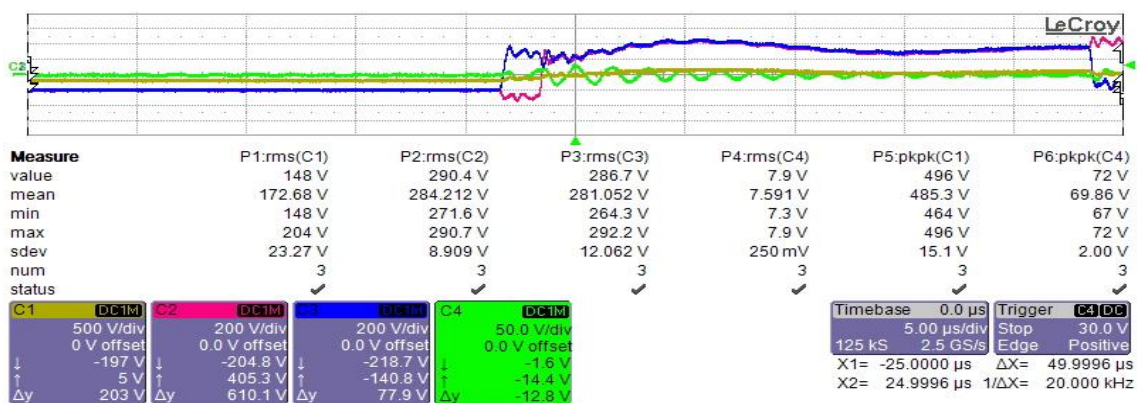


Kuva 30. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 2 kanssa taajuudella 50 Hz. Liipaisulla on etsitty akselijännitteen suurin arvo. Kyt-kentätaajuutena on käytetty 3 kHz.

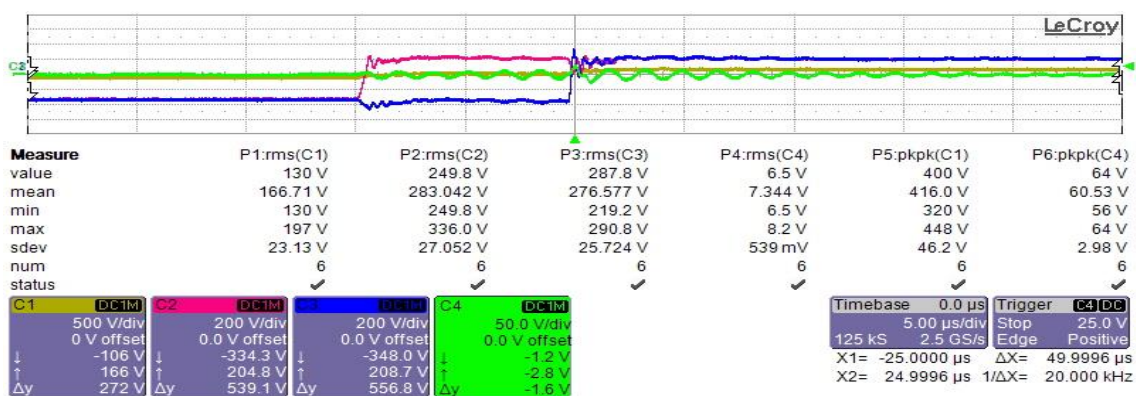


Kuva 31. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset on suoritettu taajuusmuuttajan 3 kanssa 50 Hz taajuudella. Tässäkin tapauksessa liipaisu on asetettu akselijännitteen suurimpaan arvoon. Tämän taajuusmuuttajan erona kahteen edelliseen oli merkki, rakenne sekä kytkentätaajuus 10 kHz.

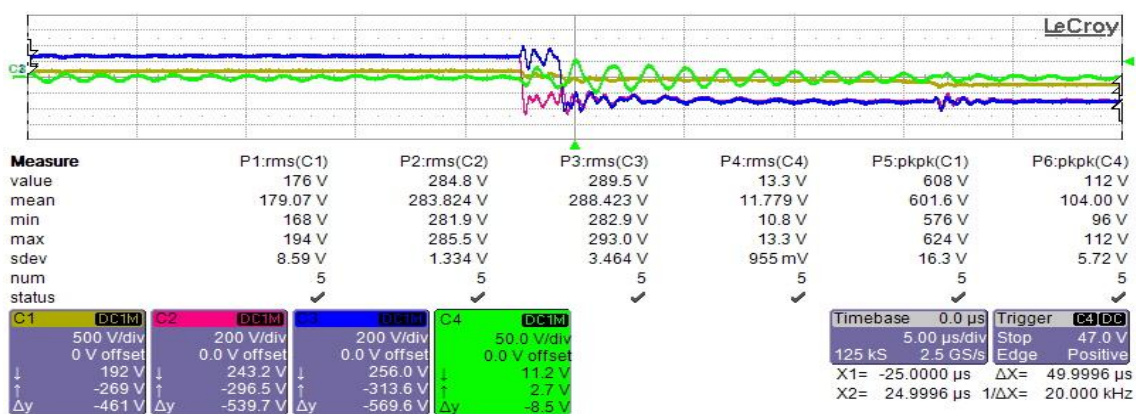
Taajuudella 50 Hz akselijännitteiden lyhyen aikavälin huipusta huippuun (peak to peak) -arvoiksi saatiin 75 V taajuusmuuttajan 1 kanssa, 70 V taajuusmuuttajalla 2 ja 123 V taajuusmuuttajalla 3. Yhteismuotoisiksi jännitteiksi samalla ajanhetkellä saatiin 512 V, 320 V ja 512 V kyseisessä taajuusmuuttajajärjestyksessä. Kuvissa 32–34 on esitetty samat mittaukset taajuudella 20 Hz.



Kuva 32. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 1 kanssa taajuudella 20 Hz. Kytkentätaajuus 3 kHz

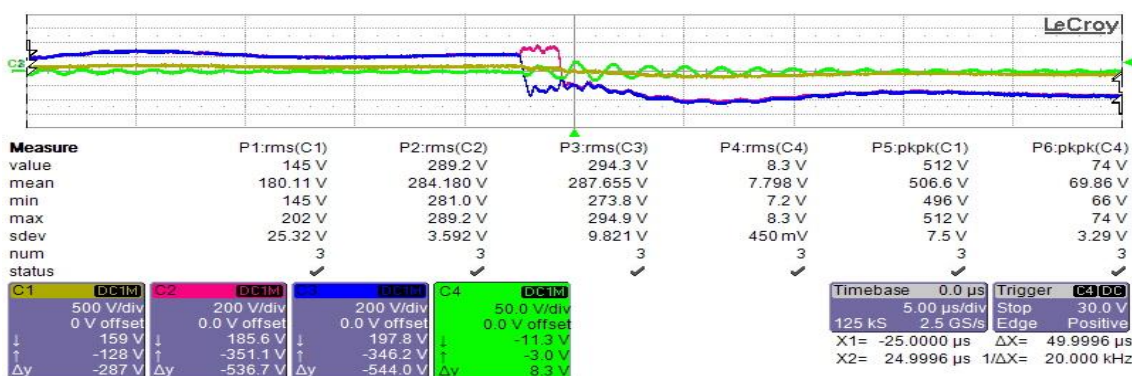


Kuva 33. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 2 kanssa taajuudella 20 Hz. KytKentätaajuus 3 kHz.

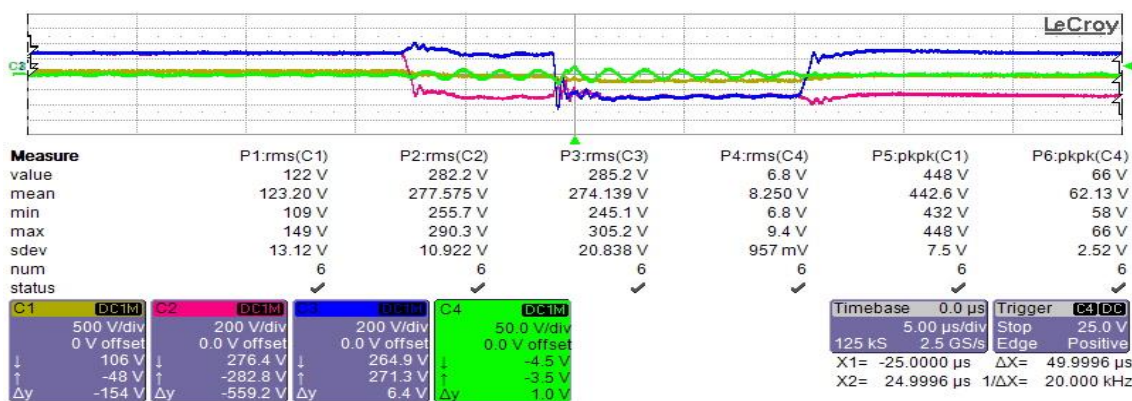


Kuva 34. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset on suoritettu taajuusmuuttajan 3 kanssa 20 Hz taajuudella. KytKentätaajuus 10 kHz.

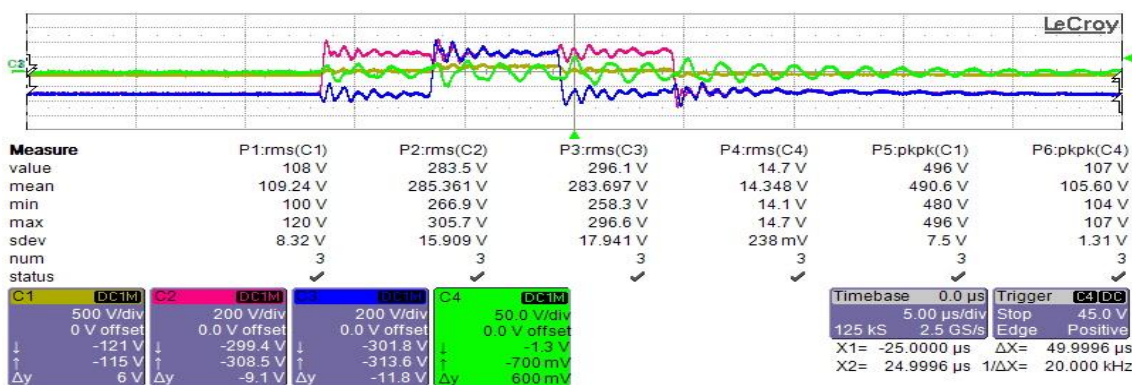
20 Hz mittauksissa akselijännitteiden lyhyen aikavälin peak to peak -arvoiksi saatiin 72 V taajuusmuuttajan 1 kanssa, 64 V taajuusmuuttajalla 2 ja 112 V taajuusmuuttajalla 3. Yhteismuotoisiksi jännitteiksi samalla ajanhetkellä saatiin 496 V, 400 V ja 608 V kyseisessä taajuusmuuttajajärjestyksessä. Seuraavaksi mitattiin samat mittaukset 60 Hz taajuudella, joiden tulokset löytyvät kuvista 35–37.



Kuva 35. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 1 kanssa taajuudella 60 Hz. KytKentätaajuus 3 kHz.



Kuva 36. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 2 kanssa taajuudella 60 Hz. KytKentätaajuus 3 kHz.



Kuva 37. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittaukset on suoritettu taajuusmuuttajan 3 kanssa 60 Hz taajuudella. KytKentätaajuus 10 kHz.

Taajuudella 60 Hz akselijännitteiden lyhyen aikavälin peak to peak -arvoiksi saatiin 74 V taajuusmuuttajan 1 kanssa, 66 V taajuusmuuttajalla 2 ja 107 V taajuusmuuttajalla

3. Yhteismuotoisiksi jännitteiksi samalla ajanhetkellä saatiin 512 V, 448 V ja 496 V kyseisessä taajuusmuuttajajärjestyksessä.

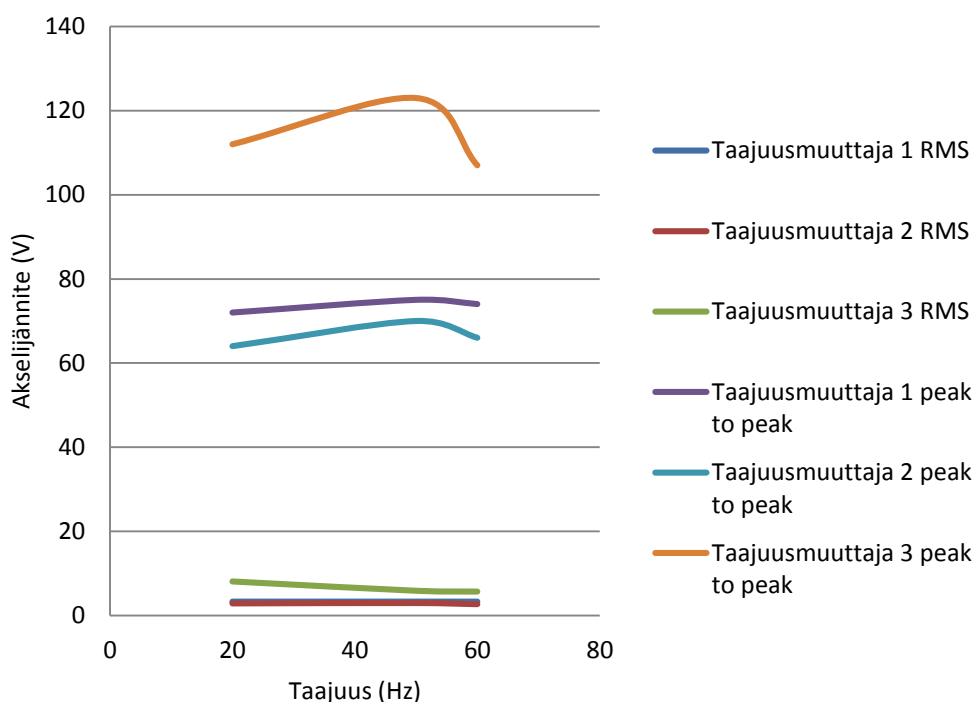
Kuvista huomataan moottorin yhteismuotoisen jännitteen sekä akselijännitteen välinen vaikutus. Suurimmat akselijännitteet syntyvät silloin, kun yhteismuotoisessa jännitteessä tapahtuu muutos. Yhteismuotoinen jännite heilahtelee aina vaiheiden kytkeytymisen mukaan. Yhteismuotoinen jännite kuvaa vaihejännitteiden summaa ajanhetkellä. Vaihejännitteiden nopeasti nousevat pulssit aiheuttavat yhteismuotoisessa jännitteessä nopeita muutoksia. Tällä tarkoitetaan sitä, että jos vaiheiden ”vaihtuminen” on epätäydellistä, aiheuttaa se eri vaiheiden signaalien summautumisen ja näin ollen yhteismuotoisen jännitteen nousun. Akselijännite vaimenee kuvien perusteella hiljalleen normaalitasolle, mutta toisen vaiheen kytkeytyminen aiheuttaa jälleen piikin yhteismuotoiseen jännitteeseen. Akselijännite voidaan kuvata eräänlaiseksi sykältelyksi yhteismuotoisen jännitteen muutoksien mukaan. Suuremmat du/dt -arvot yhteismuotoisella jännitteellä aiheuttavat myös suurempia akselijännitteitä. Eli mitä nopeampi on yhteismuotoisen jännitteen muutos, sitä suurempi on akselijännitteen huippuarvo ajanhetkellä. Taajuusmuuttajan 3 korkeampi kytkentätaajuus näkyy suurempana pulssien lukumäärässä samassa tarkasteluajassa. Kytkentätaajuus näyttää muutenkin vaikuttavan akselijännitteiden tasoon. Kytkentätaajuuden vaikutusta on pohdittu enemmän kappaleessa 4.2.

Taulukossa 3 on esitettyä M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittausten vaiheiden jännitteet, yhteismuotoinen jännite sekä RMS että huipusta huippuun -arvoina, liipaisukanava, mittausaika ja akselijännite RMS ja huipusta huippuun -arvoina. Viimeisessä sarakkeessa on myös termistorien mitattu lukema ohmeina.

Taulukko 3. M3AA 160MLB 4 moottorin mittausten tulokset on esitetty taulukossa kolmella eri taajuusmuuttajalla testattuna. Viimeisellä rivillä on esitetty myös DOL-käynnistyksen mittauksen tulokset.

	Kykentätaajuus (kHz)	Taajuus (Hz)	Ch1 yhteisnuotoinen jännite RMS (V)	Ch2 U-vaiheen jännite RMS (V)	Ch3 V-vaiheen jännite RMS (V)	Ch4 akselijännite RMS (V)	Yhteisnuotoinen jännite peak to peak (V)	Akselijännite peak to peak (V)	Oskilloskoopin mitausaika (ms)	Lippaisukanava	Termistorien lukema ennen mittausta (Ω)
Taajuusmuuttaja 1	3	20	148	290,4	286,7	7,9	496	72	0,05	4	154
Taajuusmuuttaja 1	3	20	207	279,2	282,7	3,3	800	62	20k		154
Taajuusmuuttaja 2	3	20	130	249,8	287,8	6,5	400	64	0,05	4	162
Taajuusmuuttaja 2	3	20	213	279,6	282,9	2,9	768	46	20k		162
Taajuusmuuttaja 3	10	20	176	284,8	289,5	13,3	608	112	0,05	4	162
Taajuusmuuttaja 3	10	20	179	281,4	286,6	8,1	784	106	20k		162
Taajuusmuuttaja 1	3	50	143	294,5	289,9	8,7	512	75	0,05	4	154
Taajuusmuuttaja 1	3	50	84	275,5	277,4	3,3	720	54	20k		154
Taajuusmuuttaja 2	3	50	124	274,8	287	8,5	320	70	0,05	4	162
Taajuusmuuttaja 2	3	50	104	278,8	281,3	3	720	48	20k		162
Taajuusmuuttaja 3	10	50	92	280	252,2	15,5	512	123	0,05	4	162
Taajuusmuuttaja 3	10	50	101	282,6	285,2	5,9	784	107	20k		162
Taajuusmuuttaja 1	3	60	145	289,2	294,3	8,3	512	74	0,05	4	154
Taajuusmuuttaja 1	3	60	102	281,9	284,2	3,3	768	56	20k		154
Taajuusmuuttaja 2	2,3	60	122	282,2	285,2	6,8	448	66	0,05	4	162
Taajuusmuuttaja 2	2,3	60	97	281,7	283,7	2,7	720	46	20k		162
Taajuusmuuttaja 3	10	60	108	283,5	296,1	14,7	496	107	0,05	4	162
Taajuusmuuttaja 3	10	60	94	279,8	282,1	5,7	800	98	20k		162
DOL			4,8	257,7	37,1	3,95	38	31,2	0,05		
DOL			3,6	232,3	233,2	1,76	32	19,2	20k		

Kuvassa 38 on esitetty taulukon 3 mittaustulokset kaaviona.



Kuva 38. Moottorin M3AA 160MLB 4 akselijännitteiden mittaustulokset on esitetty kaavioissa. Samat arvot löytyvät myös taulukosta 3.

Kaaviossa on esitetty yhteismuotoisten jännitteiden sekä akselijännitteiden RMS -arvot ja peak to peak -arvot. RMS-arvoja enemmän työssäni kiinnostuksen kohteena ovat peak to peak -arvot, sillä niistä voidaan päätellä kuinka suuriksi jännitepulsit voivat nousta. Tulokset menevät joiltakin osin ristiin yhteismuotoisen jännitteen ja akselijännitteen osalta, mutta pääsääntöisesti suuremmalla taajuusmuuttajan kytkentätaajuudella aiheutetaan suurempia yhteismuotoisia jännitteitä sekä akselijännitteitä.

Akselijännitteiden suurimmat arvot tulivat kytkentätaajuudella 10 kHz taajuusmuuttajalla 3. Kyseisessä mittauksessa etsittiin liipaisun avulla suurinta akselijännitettä 50 μ s ajalta. Akselijännitteiksi taajuusjärjestyksessä 20 Hz, 50 Hz, 60 Hz saatiin 112 V, 123 V ja 107 V taajuusmuuttajalla 3. Taajuusmuuttajan 1 vastaavat arvot olivat 72 V, 75 V ja 74 V. Taajuusmuuttajalla 1 käytössä oli 3 kHz kytkentätaajuus. 3 kHz kytkentätaajuus oli käytössä myös taajuusmuuttajassa 2, jolle vastaaviksi arvoiksi saatiin 64 V, 70 V ja 66 V. Merkittävää tuloksissa oli peak to peak -arvojen suuruus verrattaessa DOL-käyttöön. DOL-käytöllä akselijännitteen peak to peak -arvoksi saatiin 31 V.

RMS-arvojen tasoissa luotettavin arviointitapa on katsoa pitkän aikavälin jännitteitä, jolloin nähdään akselijännitteiden taso. Tässäkin pitkän ajan mittauksessa taajuusmuuttajalla 3 saatiin korkeimmat RMS-jännitteet. Taajuusmuuttajan 3 arvot taajuusjärjestyksessä 20 Hz, 50 Hz, 60 Hz olivat 8,1 V, 5,9 V ja 5,7 V. Taajuusmuuttajalla 1 vastaavat arvot olivat kaikilla taajuuksilla 3,3 V. Taajuusmuuttajan 2 arvot olivat 2,9 V, 3 V ja 2,7 V. Kyseisistä mittaustuloksista huomataan taajuusmuuttajalla 3 saatavien akselijännitetasojen olevan kaksinkertaisia toisiin nähden.

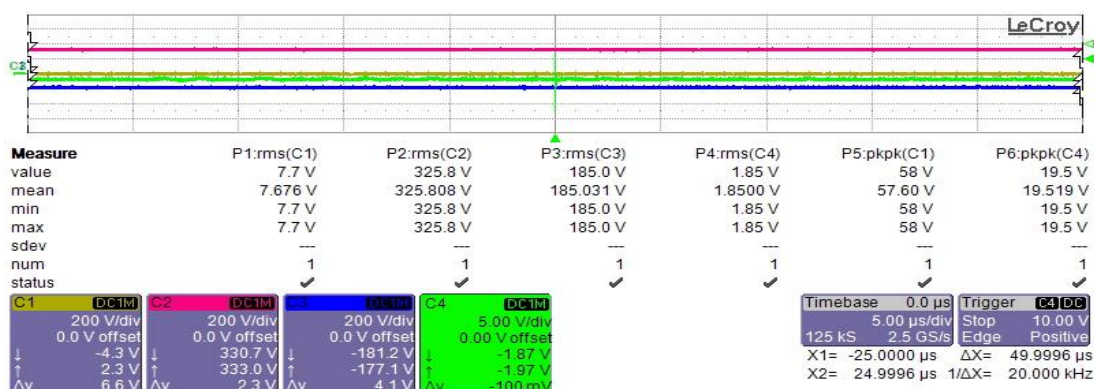
Tällä moottorilla kokeiltiin myös taajuusmuuttajan 3 kytkentätaajuuden muuttamista samaksi kuin kahdella muulla taajuusmuuttajalla. Lopputuloksena akselijännitteet pysyivät kuitenkin lähes samoina kuin 10 kHz kytkentätaajuudella. Tästä voidaankin todeta, ettei kytkentätaajuuden vaikutus ollut niin suuri kuin odotettiin.

4.2 HXA 132SMD 4-napaisen moottorin mittaukset

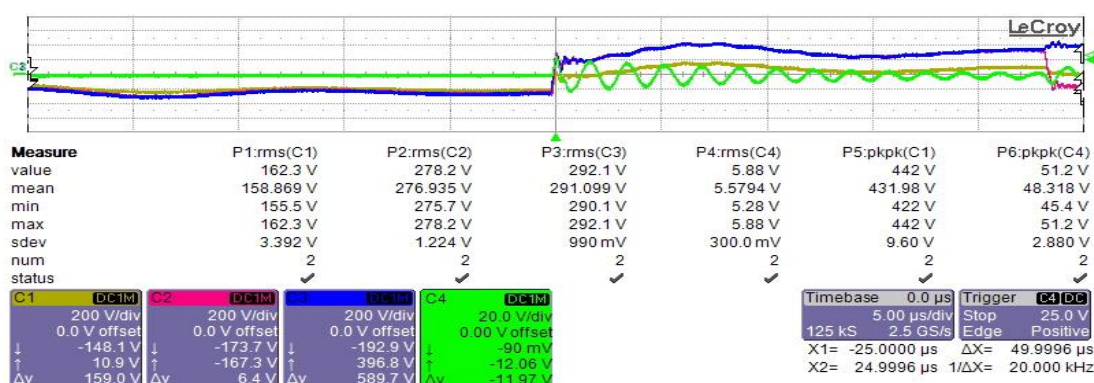
Mittaustulokset on esitetty kuvina kaikkien kolmen taajuusmuuttajan käytöistä jokaisella taajuudella. Mittauskuvien merkittävimmät tulokset löytyvät myös taulukosta 4 sekä kuvan 49 kaavioista.

Näissäkin mittauskuvissa kanavassa C1 keltaisella värillä on piirretty yhteismuotoinen jännite. Kanavassa C2 punaisella on *U*-vaiheen jännite ja kanavassa C3 sinisellä *V*-vaiheen jännite. Liipaisukanavassa C4 on esitetty akselijännite vihreällä.

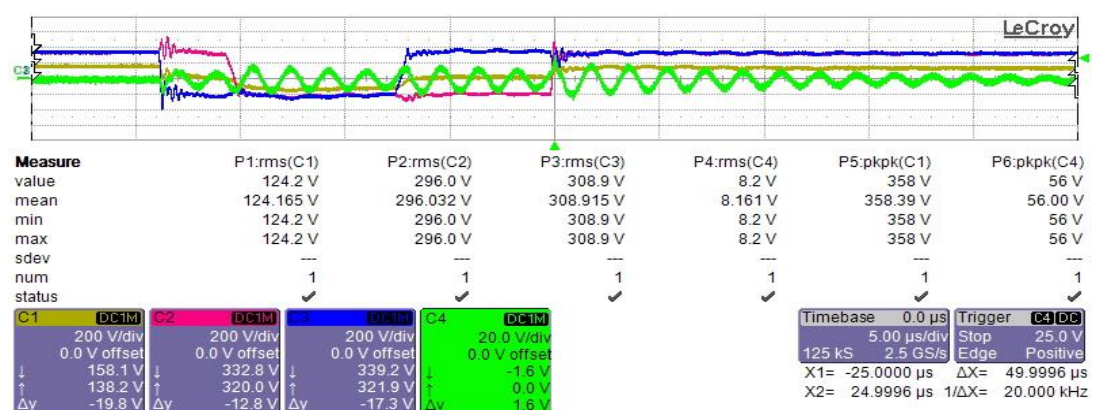
Kuvassa 39 on esitetty DOL-käytön mittaustulokset. Kuvissa 40–42 on esitetty edellisen luvun tapaan oskilloskooppikuvat 50 Hz mittauksista jokaisella taajuusmuuttajalla.



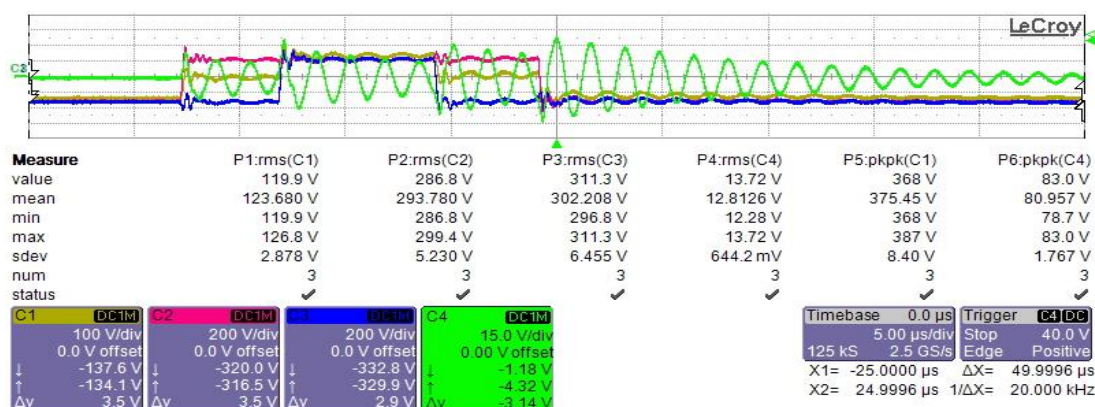
Kuva 39. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset DOL-käytössä. Jännitetasot ovat huomattavasti pienemmät taajuusmuuttajakäyttöihin verrattaessa.



Kuva 40. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 1 kanssa taajuudella 50 Hz. Liipaisulla on etsitty akselijännitteen suurin arvo. Kyt-kentätaajuutena on käytetty 3 kHz.

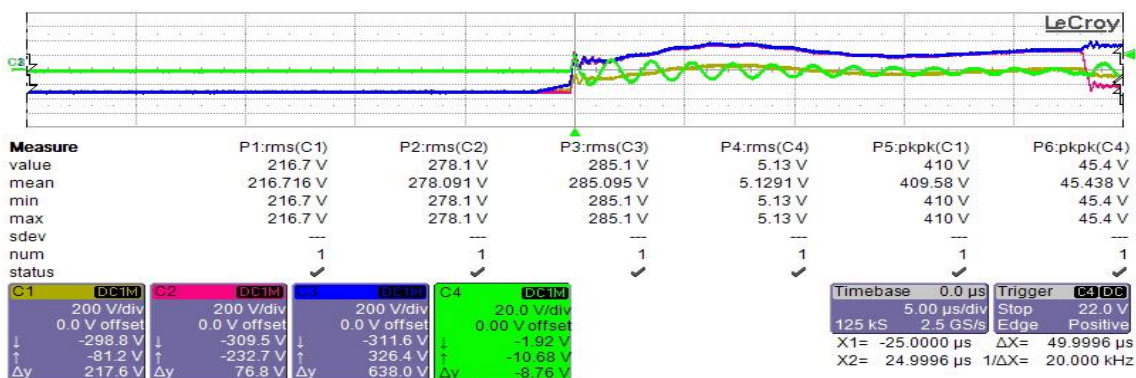


Kuva 41. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 2 kanssa taajuudella 50 Hz. Liipaisulla on etsitty akselijännitteen suurin arvo. Kyt-kentätaajuutena on käytetty 3 kHz.

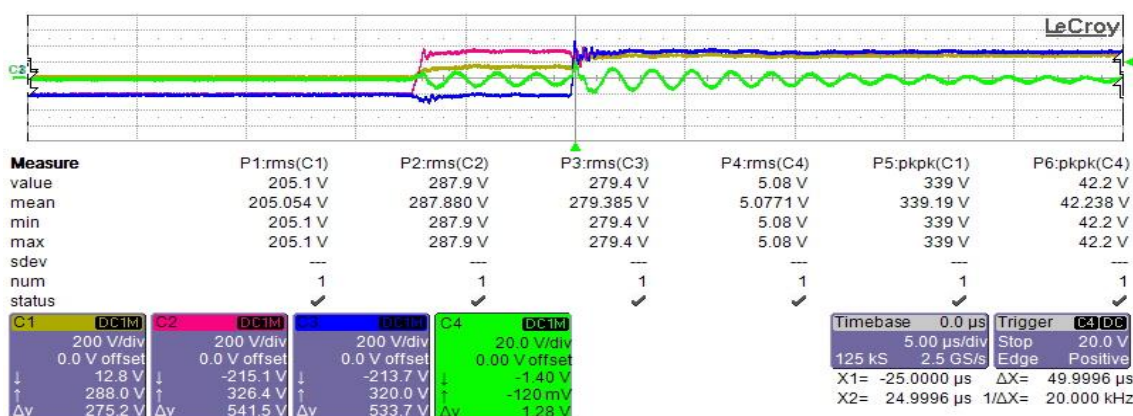


Kuva 42. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset on suoritettu taajuusmuuttajan 3 kanssa 50 Hz taajuudella. Tässäkin tapauksessa liipaisu on asetettu akselijännitteen suurimpaan arvoon. Tämän taajuusmuuttajan erona kahteen edelliseen oli merkki, rakenne sekä kytkentätaajuus 10 kHz.

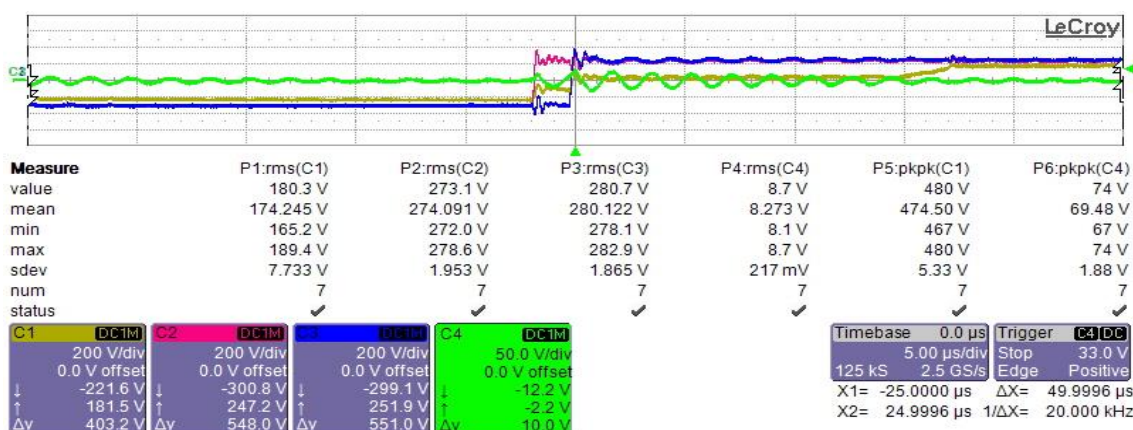
Taajuudella 50 Hz akselijännitteiden lyhyen aikavälin peak to peak -arvoiksi saatiin 51 V taajuusmuuttajalla 1, 56 V taajuusmuuttajalla 2 ja 83 V taajuusmuuttajalla 3. Yhteismuotoisiksi jännitteiksi samalla ajanhetkellä saatiin 442 V, 358 V ja 368 V kyseisellä taajuusmuuttajien järjestyksellä. Kuvissa 43–45 on esitetty samat mittaukset taajuudella 20 Hz.



Kuva 43. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 1 kanssa taajuudella 20 Hz. Kytchentätaajuus 3 kHz

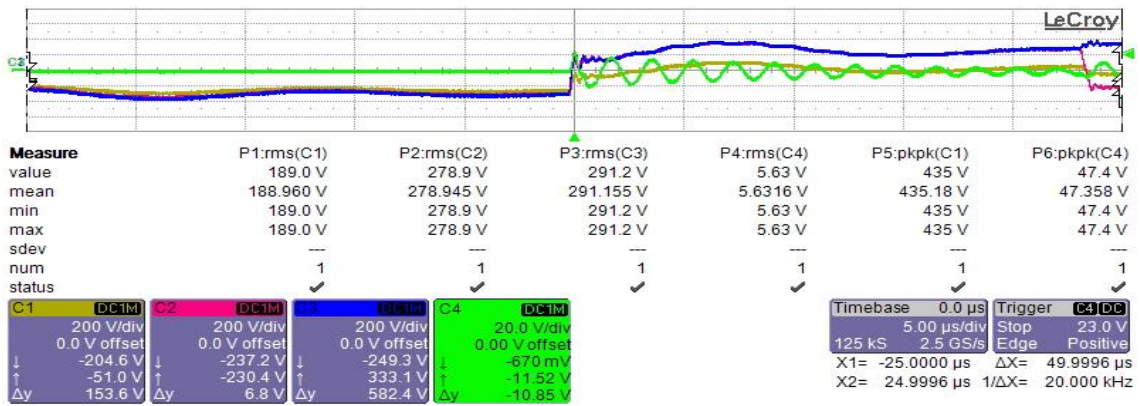


Kuva 44. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 2 kanssa taajuudella 20 Hz. KytKentätaajuus 3 kHz.

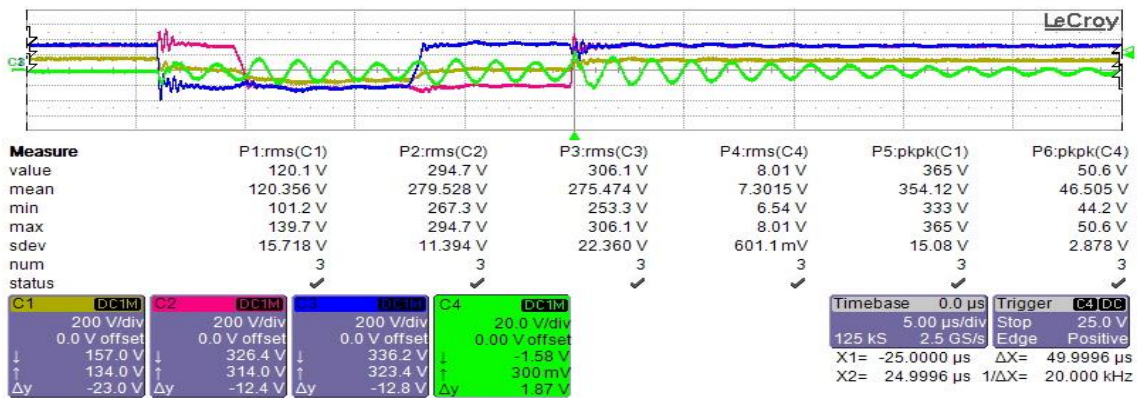


Kuva 45. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset on suoritettu taajuusmuuttajan 3 kanssa 20 Hz taajuudella. KytKentätaajuus 10 kHz.

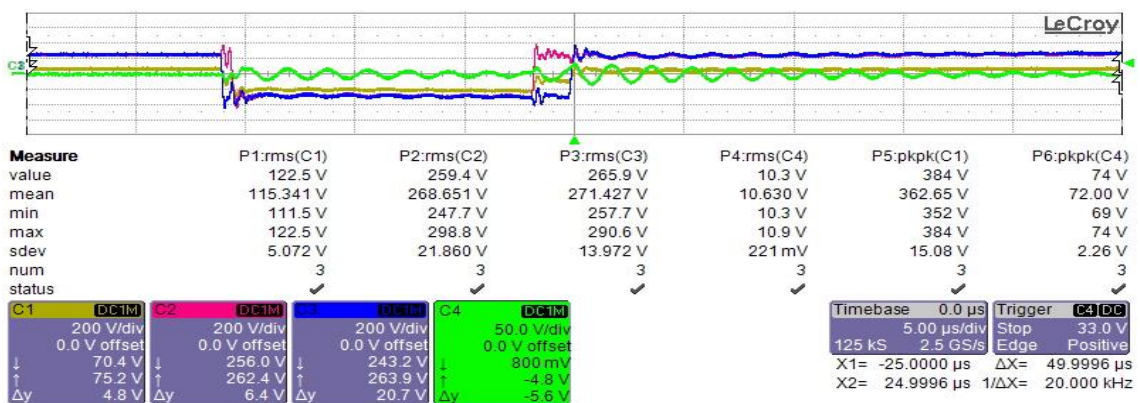
Taajuudella 20 Hz akselijännitteiden lyhyen aikavälin peak to peak -arvoiksi saatiin 45 V taajuusmuuttajan 1 kanssa, 42 V taajuusmuuttajalla 2 ja 74 V taajuusmuuttajalla 3. Yhteismuotoisiksi jännitteiksi samalla ajanhetkellä saatiin 410 V, 339 V ja 480 V kyseisellä taajuusmuuttaja järjestyksellä. Seuraavaksi mitattiin samat mittaukset 60 Hz taajuudella, jotka löytyvät kuvista 46–48.



Kuva 46. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 1 kanssa taajuudella 60 Hz. KytKentätaajuus 3 kHz.



Kuva 47. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset taajuusmuuttajan 2 kanssa taajuudella 60 Hz. KytKentätaajuus 3 kHz.



Kuva 48. HXA 132SMB 4-napaisen moottorin mittaukset on suoritettu taajuusmuuttajan 3 kanssa 60 Hz taajuudella. KytKentätaajuus 10 kHz.

60 Hz mittauksilla akselijännitteiden lyhyen aikavälin peak to peak -arvoiksi saatiin 47 V taajuusmuuttajan 1 kanssa, 51 V taajuusmuuttajalla 2 ja 74 V taajuusmuuttajalla 3.

Yhteismuotoisiksi jännitteiksi samalla ajanhetkellä saatiin 435 V, 365 V ja 384 V kyseisellä taajuusmuuttaja järjestyksellä.

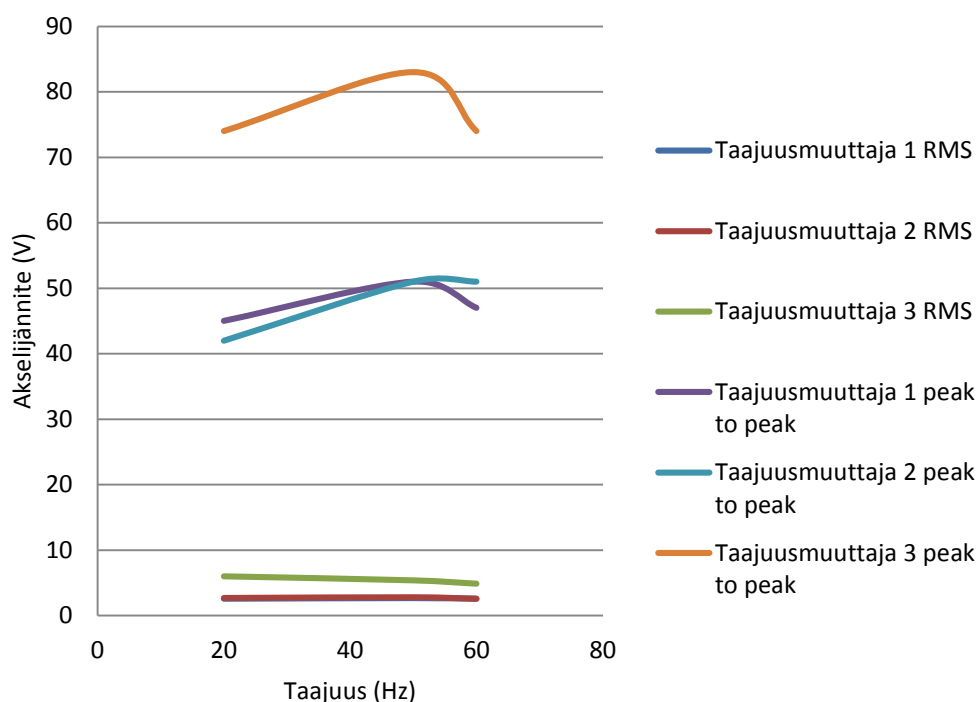
Moottorin yhteismuotoiset jännitteet sekä akselijännitteet käyttäytyivät samalla tavalla kuin suuremmallakin koneella. Akselijännite varautuu yhteismuotoisen jännitteessä tapahtuvien muutosten mukana. Mitä nopeampi muutos on yhteismuotoisessa jännitteessä, sitä korkeampi on akselijännitteen huippuarvo. Ero DOL-käyttöön on huomattava tässäkin tapauksessa.

Taulukossa 4 on esitetty HXA 132SMD 4-napaisen moottorin mittaustulokset.

Taulukko 4. HXA 132SMD 4-napaisen moottorin mittausten tulokset on esitetty taulukossa kolmella eri taajuusmuuttajalla testattuna. Viimeisellä rivillä on esitetty myös DOL-käynnistyksen tulokset.

	Kytkeäntaajuus (kHz)	Taajuus (Hz)	Ch1 yhteisuuotoinen jännite RMS (V)	Ch2 U-vaiheen jännite RMS (V)	Ch3 V-vaiheen jännite RMS (V)	Ch4 akselijännite RMS (V)	Yhteisuuotoinen jännite peak to peak (V)	Akselijännite peak to peak (V)	Oskilloskoopin mitausaika (ms)	Liipaisukanava
Taajuusmuuttaja 1	3	20	217	278	285	5,1	410	45	0,05	4
Taajuusmuuttaja 1	3	20	206	275	278	2,6	736	41	20k	
Taajuusmuuttaja 2	3	20	205	288	279	5,1	339	42	0,05	4
Taajuusmuuttaja 2	3	20	210	273	276	2,7	691	43	20k	
Taajuusmuuttaja 3	10	20	180	273	281	8,7	480	74	0,05	4
Taajuusmuuttaja 3	10	20	174	273	279	6	691	67	20k	
Taajuusmuuttaja 1	3	50	162	278	292	5,9	442	51	0,05	4
Taajuusmuuttaja 1	3	50	127	284	287	2,7	710	40	20k	
Taajuusmuuttaja 2	3	50	124	296	309	8,2	358	56	0,05	4
Taajuusmuuttaja 2	3	50	111	274	276	2,8	646	39	20k	
Taajuusmuuttaja 3	10	50	120	287	311	13,7	368	83	0,05	4
Taajuusmuuttaja 3	10	50	100	274	275	5,4	666	89	20k	
Taajuusmuuttaja 1	3	60	189	279	291	5,6	435	47	0,05	4
Taajuusmuuttaja 1	3	60	100	276	278	2,6	710	40	20k	
Taajuusmuuttaja 2	2,3	60	120	295	306	8	365	51	0,05	4
Taajuusmuuttaja 2	2,3	60	95	274	276	2,6	634	44	20k	
Taajuusmuuttaja 3	10	60	123	259	266	10,3	384	74	0,05	4
Taajuusmuuttaja 3	10	60	96	272	275	4,9	710	67	20k	
DOL			7,7	326	185	1,9	58	20	0,05	
DOL			8,3	230	231	1,8	64	3	20k	

Kuvassa 49 on esitetty taulukon 4 akselijännitteet mitatuilla taajuuksilla selkeämpänä kaaviokuvana.



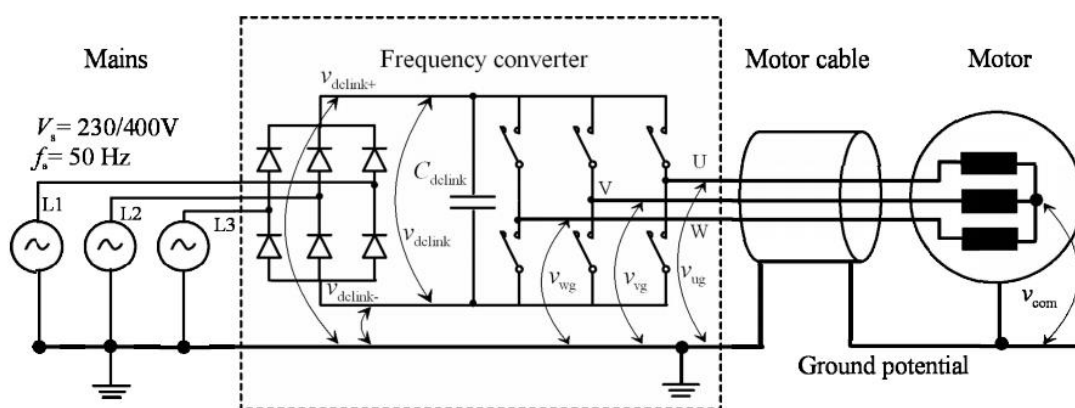
Kuva 49. Moottorin HXA 132SMB 4-napasien moottorin mittaustulokset on esitetty kaavioissa. Samat arvot löytyvät myös taulukosta 4. Kaavioista huomataan helposti yhteismuotoisen jännitteen ja akselijännitteen välinen suhde.

HXA 132SMB 4-napaisella moottorilla korkeimmat peak to peak -akselijännitteet saadaan 10 kHz kytkentätaajuudella, kuten toisellakin koneella. Tällä kertaa 10 kHz taajuusmuuttajan 3 akselijännitteet taajuusjärjestyksessä 20 Hz, 50 Hz, 60 Hz ovat 74 V, 83 V ja 74 V. Kappaleessa 4.1.1 todettiin myös taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden vaikuttavan hyvin vähäisesti akselijännitteen tasoon, joten itse laitteen toimintaperiaatteella on suurempi merkitys. Taajuusmuuttajalla 1 kytkentätaajuudella 3 kHz vastaavat arvot ovat 45 V, 51 V ja 47 V. Taajuusmuuttajalla 2 kytkentätaajuudella 3 kHz samat arvot ovat 42 V, 56 V ja 51 V. DOL-käytön akselijännite peak to peak-arvona on 20 V.

Myös tällä vanhemmalla moottorilla mitattiin RMS-jännitteet pitkällä aikavälillä. Taajuusmuuttajan 3 arvot järjestyksessä 20 Hz, 50 Hz, 60 Hz olivat 6 V, 5,4 V ja 4,9 V. Taajuusmuuttajalla 1 vastaavat arvot olivat 2,6 V, 2,7 V ja 2,6 V. Viimeisen taajuusmuuttajan 2 arvot olivat 2,7 V, 2,8 V ja 2,6 V. Kyseisistä mittaustuloksista huomataan tälläkin koneella, että taajuusmuuttajalla 3 saatavien akselijännitetasojen olevan kaksinkertaisia toisiinsa nähden.

4.3 Taajuusmuuttajan vaikutus laakerivirtoihin

Taajuusmuuttajan vaikutus laakerivirtoihin tunnetaan jo, ja varsinkin nopeat taajuuden muutokset aiheuttavat pahimmillaan suurien akselijännitteiden indusoitumista akseliin. Laakerivirtaongelma onkin noussut uudelleen pinnalle taajuusmuuttajien käytön lisääntyessä. Kuvassa 50 nähdään taajuusmuuttajallinen moottorin syöttökaavio.



Kuva 50. Kaksitasoisen taajuusmuuttajan rakenne kuvattuna osana moottorikäyttöä kuvaavaa kaaviota (Ahola 2011: 9). Vasemmasta reunasta lähtien kuvassa näkyvät kolmivaihesyöttö, taajuusmuuttaja, moottorikaapeli ja moottori.

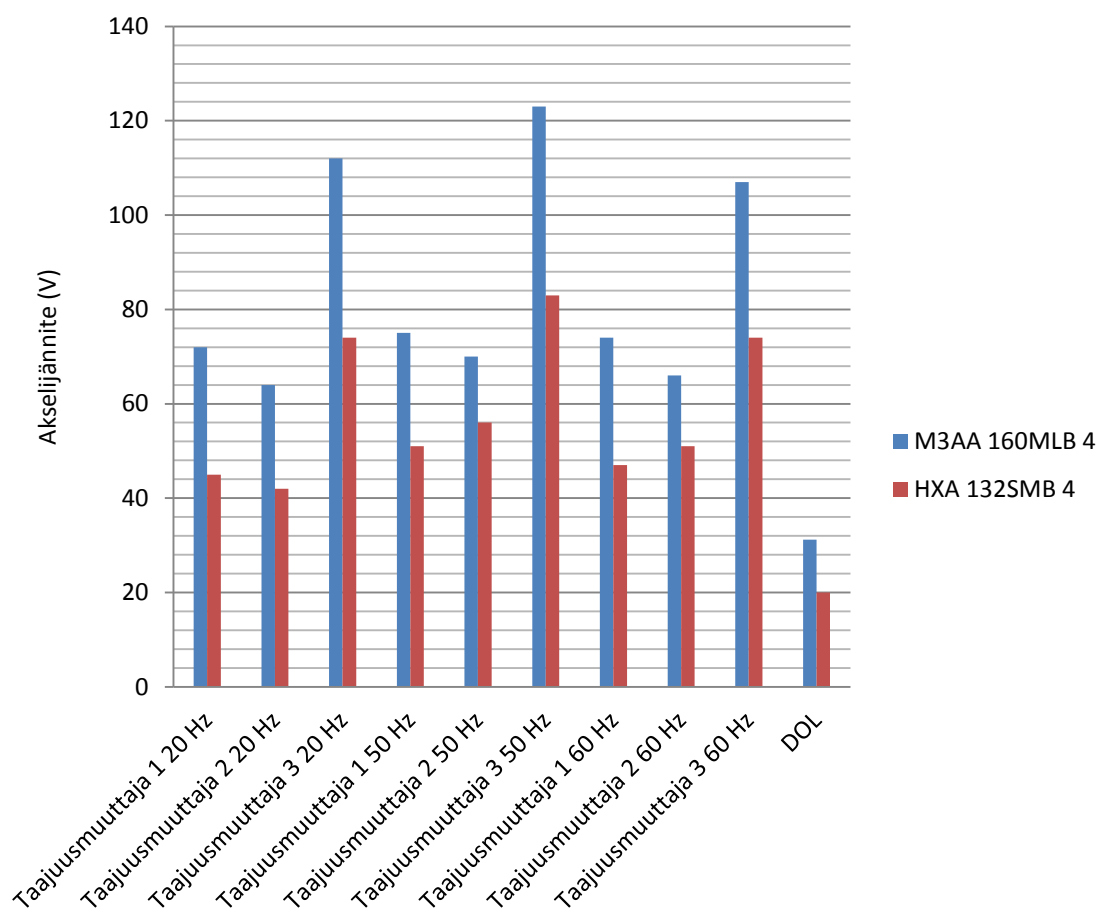
Edellisten lukujen kuvista huomattiin akselijännitteen muutosten seuraavan yhteismuotoisen jännitteen sykähtelyä. Yhteismuotoinen jännite taas näyttää seuraavan vaiheiden kytkeytymistä. Tämä johtuu siitä, kun taajuusmuuttajan syöttämä signaali ei olekaan symmetristä kolmivaihejännitettä, jolloin vaiheet saattavat olla kytkeytyneenä osittain samanaikaisesti. Jos kaksi vaihetta tuottaa samansuuntaisen yhteismuotoisen virran, ne summatuvat. Vastaavasti, virtojen ollessa erisuuntaiset, yhteismuotoinen virta on niiden erotus. Vaihtosuuntaajan korkea kytkentätaajuus tekee yhteismuotoisesta jännitteestä myös korkeataajuisen, koska moottorien nimellistaajuus on 50 Hz tai 60 Hz. Moottorikaapelien hajakapasitanssit vaiheiden ja maan välillä muodostavat kulkureitin korkeataajuisille yhteismuotoisille virroille. Mitä suurempi taajuus yhteismuotoisella virralla on, sitä pienempi impedanssi hajakapasitansseista näkyy vaiheen ja maan välille. Tämän seurauksena voidaan olettaa testeissä käytetyn taajuusmuuttajan 3 aiheuttavan korkeampia yhteismuotoisia jännitteitä. Tuloksista huomataan tämän toteutuvan, eli todennäköi-

sesti korkea kytkentätaajuus taajuusmuuttajassa aiheuttaa suurempia heilahteluja yhteismuotoisessa jännitteessä. Yhteismuotoisen jännitteen noustessa suurempiin arvoihin, myös akselijännite on sen seurauksena korkeampi (Kuusinen 2014: 15–18).

Tarkasteltaessa taulukoiden 3 ja 4 akselijännitteitä, voidaan huomata huippuarvoissa varsin suuria eroja eri taajuusmuuttajien välillä. Ero ei tosiaan ole pelkästään kytkentätaajuudesta riippuvainen, sillä mittauksissa kokeiltiin taajuusmuuttajalla 3 myös 3 kHz kytkentätaajuudella akselijännitteiden tasoa. Kyseisellä muutoksella ei merkittäviä eroja saatu aikaiseksi. Taajuusmuuttajilla testatessa peak to peak -arvot nousivat varsin korkeiksi DOL-käyttöön verrattaessa. Taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden vaikutus on huomattava, mutta yleisesti taajuusmuuttajan käyttö moottorin syötössä on vielä suurempi haitta akselijännitteiden ja laakerivirtojen osalta. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin mittauksissa suurin taajuusmuuttajasyötön peak to peak -akselijännite 50 Hz taajuudella oli 123 V. DOL-käytössä suurin vastaava arvo oli 31 V. Ero näiden välillä on erittäin merkittävä. Vastaavasti HXA 132SMB 4-koneen akselijännitteet samalla taajuudella olivat 83 V ja 20 V.

4.4 Moottorimallin vaikutus akselijännitteisiin

Työn tarkoituksena oli vertailla uuden ja vanhan mallin moottorityyppejä akselijännitteiden ja laakerivirtojen osalta. Testikoneemme eivät olleet samankokoisia, joten vertailua tehdessä tulee huomioida kyseinen asia. Myös kentänheikennyspisteet koneiden välillä erosivat, sillä vanhanmallisen koneen arvokilvessä ei ollut 400 V jännitettä. Pienemmässä moottorissa käytettiin 380 V jännitettä, eli vaikutus ei pitäisi olla merkittävän suuri. Kuvassa 51 on vertailtu testikoneiden akselijännitteiden peak to peak -arvoja.



Kuva 51. Moottorityyppien vertailu. Pystyakselilla on esitettyä akselijännite peak to peak -arvona ja vaaka-akselilla eri taajuusmuuttajakäytöt 20 Hz, 50 Hz ja 60 Hz taajuuksilla.

Pylväsdiagrammissa esitetyt tulokset ovat suhteellisen merkittäviä, sillä moottoreiden akselijännitteiden välillä on iso ero. Moottorin M3AA 160MLB 4 akselijännitteet ovat huomattavasti suuremmat jokaisella taajuusmuuttajalla ja taajuudella kuin moottorin HXA 132SMB 4 vastaavat arvot. Ero moottoreiden välillä on noin 20 V taajuudesta ja taajuusmuuttajasta riippumatta. Korkeammalla kytkentätaajuudella (taajuusmuuttaja 3) ero on noin 40 V, eli selvästi suurempi. Lisäksi pylväsdiagrammista huomataan taajuusmuuttajan vaikutus akselijännitteiden huippuarvojen tasoon.

Uusissa koneissa ilmaväliä on pienennetty suhteessa pinta-alaan, urien täyttekertoimia kasvatettu ja sähköisellä suunnittelulla pyritty kohti suurempaa hyötysuhdetta. Hyötysuhdevaatimusten kasvaessa ja asiakkaiden paineen vaikutuksesta on jatkuvasti pyritty

energiatehokkaampiin moottoreihin. Tämän seurauksena sähköistä rakennetta on muutettu suuntaan, jossa akselijännitteiden taso on kasvanut. Esimerkiksi ilmavälin pienentäminen aiheuttaa sen, että akselin ja rungon välille indusoituu käämityksestä entistäkin suurempi jännite. Kyseinen jännite näkyy mittauksissamme suurempina akselijännitepulsseina.

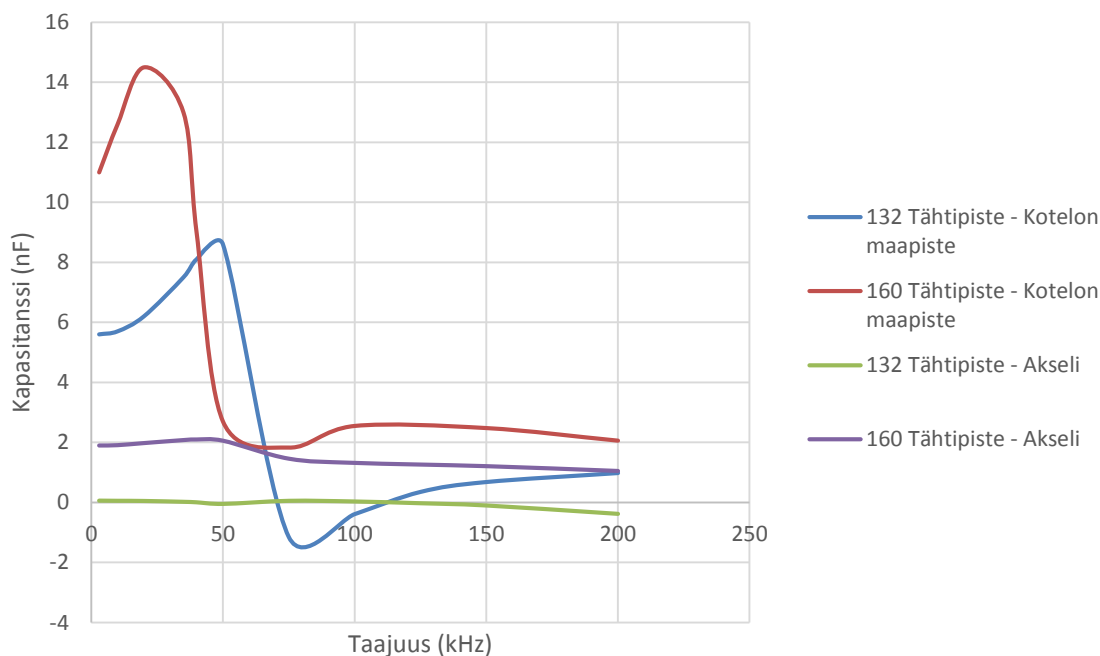
HXA 132SMB 4-napaisen moottorin ilmaväliksi on laskelmissa ilmoitettu 0,4–0,45 mm. Johtimia urassa on 72 ja staattorin uraluvuksi on ilmoitettu 36. Uraeristettä ei laskelmassa ole ilmoitettu, mutta oletuksena vuosien saatossa eristepaksuuksia on varmasti pienennetty. M3AA 160MLB 4-napaisen moottorin ilmaväli on 0,55 mm, uraluku 36 ja johtimia urassa 95. Suurempi ilmaväli on aivan normaalia, kun kyseessä on suurempi kone. Ilmavälin vaikutus perustuukin suhteeseen pinta-alan kanssa. Tämä voidaan päätellä yhtälöstä 5. Suuremmalla koneella on suurempi pinta-ala, joten ilmavälin täytyy kasvaa suhteessa yhtä paljon. Kapasitanssit ovat hyvin pieniä, joten pienikin muutos pinta-alan ja ilmavälin välillä voi aiheuttaa suuriakin muutoksia. Uraluvut ovat samat, vaikka koneet ovat erikokoisia. Uudemmassa moottorissa urissa on enemmän johtimia, koska urat ovat suurempia. Ilmavälin, täytekerroimen ja urageometrian välillä ei siis ole niin suuria eroja, mutta pienissä kapasitansseissa ne saattavat olla merkittäviä. On myös mahdollista, että eristepaksuuksia joko kääminpäissä tai urissa on muokattu vuosien varrella. Eristeet vaikuttavat moottorin sisäisiin kapasitansseihin samoin kuin ilmavälikin.

Suoritimme kyseisen teorian pohjaksi myös kapasitanssimittaukset, jotta nähdään onko uudessa koneessa suurempi kapasitanssi käämityksen ja akselin sekä rungon ja käämityksen välillä. Koneen sisäisten kapasitanssien määrästä nähdään, että onko koneen sähköisen rakenteen muokkauksella aiheutettu vahinkoa akselijännitteiden osalta. Koneen sisäiset kapasitanssit ovat pieniä, mutta nopeasti nousevien jännitepulssien kanssa ne aiheuttavat virralle pieni-impedanssisen reitin ja lisäävät näin ollen laakerivirtoja. Kapasitiivisen reaktanssin, impedanssin ja kapasitanssin välistä riippuvuutta on käsitelty aiemmin työssä kaavan 3 mukaan. Kertauksena voisin todeta, että kapasitanssin kasvessa kapasitiivinen reaktanssi pienenee ja näin ollen myös impedanssi Z pienenee yhtälön 10 mukaan

$$Z = R + jX, \quad (10)$$

missä R on resistanssi ja X reaktanssi. Tärkeimmät kapasitanssit koneen sisällä ovat nimetään käämityksen tähtipisteen ja akselin välinen kapasitanssi sekä käämityksen tähtipisteen ja kotelon maapisteen välinen kapasitanssi, koska nämä aiheuttavat kapasitiivisen laakerivirran kytkeytymisen akselin ja rungon välille. Mittaukset suoritettiin suhteellisen vanhalla LCR-mittarilla syöttämällä 1 V jännitettä useilla eri kytkentätaajuuksilla. Tällä saatiin mitattua taajuusmuuttajien käyttämien kytkentätaajuuksien kapasitanssit moottorin sisällä.

LCR-mittari oli tosiaan vanha, joten tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti. Kapasitanssimittausten epäluotettavuuden vuoksi laakerijännitesuhteen vertailussa tulee käyttää aiemmin mainittuja jännitearvoja. Kapasitanssiarvoista voidaan kuitenkin todeta niiden taso ja näin ollen vertailla koneiden välisiä eroja. Kapasitanssit mitattiin paikallaan olevasta koneesta, joten kapasitanssiarvot saattavat olla erilaiset pyörimisen aikana. Kuvassa 52 on esitetty kapasitanssimittausten tulokset.

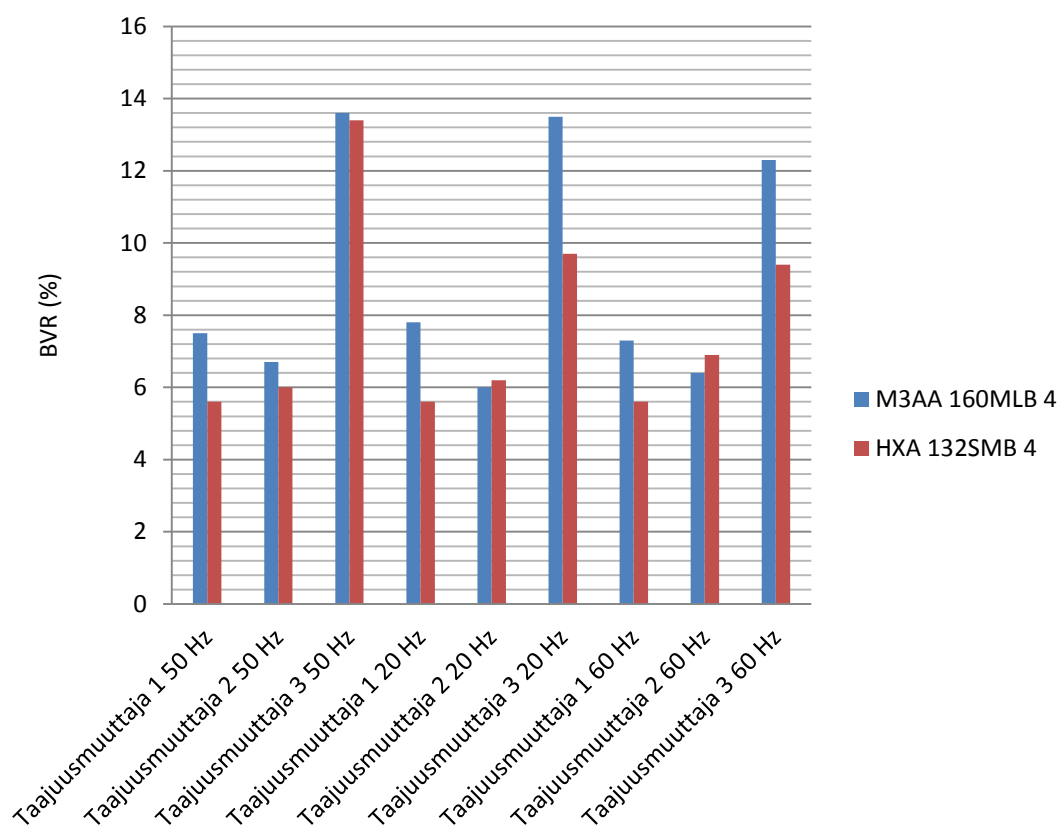


Kuva 52. Testikoneiden kapasitanssit kytkentätaajuuden funktiona. Kapasitanssit on mitattu käämityksen tähtipisteen ja kotelon maapisteen väliltä sekä tähtipisteen ja akselin väliltä.

Kuvasta huomataan, että 160MLB 4-napaisen moottorin kapasitanssit tähtipisteen ja kotelon maapisteen välillä ovat korkeammat. Myös kapasitanssi on suuremmalla koneella muodostunut pienemmällä taajuudella. Tämä on huolestuttavaa siksi, että juuri tuolla alueella nykyisten taajuusmuuttajien kytkentätaajuudet liikkuvat. Esimerkiksi 10 kHz kytkentätaajuudella tähtipisteen ja kotelon maapisteen välinen kapasitanssi on lähes kaksinkertainen. Korkeampi kapasitanssi luo suuremman potentiaalieron maan ja käämityksen välille, eli jännite kasvaa suuremmaksi. Tämä aiheuttaa lisää potentiaaliero akselin ja maan välille, minkä seurauksena laakerin kautta kulkevien läpilyöntien todennäköisyys kasvaa. Moottorin koko vaikuttaa kapasitanssien suuruuteen, joten se saattaa olla osasy syy suurempiin kapasitansseihin. Muita syitä korkeampiin kapasitanssiarvoihin ovat työssä aiemmin mainitut koneen sisäiset muutokset, kuten geometria sekä eristemateriaalit ja paksuudet.

Tähtipisteen ja akselin välinen kapasitanssi on linjassa tähtipisteen ja maapisteen väliin mittauksiin verrattuna. Myös tässä tapauksessa suuremman koneen kapasitanssi on korkeampi. Ero on kuitenkin suhteellisen suuri, vaikka koneen koko kapasitanssiin vaikuttaakin. Kapasitanssin suureneminen ei suoraan todista syytä lisääntyneisiin akselijännitteisiin, sillä käytössä oli kooltaan erilaiset moottorit. Eron ollessa näin suuri, on kuitenkin todennäköistä, että kapasitanssin muutokset koneiden välillä vaikuttavat myös laakerijännitesuhteeseen. BVR-arvon kasvaessa suurempi osa yhteismuotoisesta jännitteestä vaikuttaa akselijännitteeseen. Moottorin koko ei vaikuta BVR arvojen väliseen vertailuun, joten siksi on hyvä käyttää sitä kasvaneiden akselijännitteiden vertailussa. Moottoreiden kapasitanssiarvojen ollessa näinkin suuria tähtipisteen ja kotelon maapisteen välillä, voidaan olettaa myös laakerijännitesuhteen muuttuvan kytkentätaajuuden mukaan. Tulosten pohjalta voidaan miettiä, miksi uudemman moottorin sisäiset kapasitanssit tähtipisteen ja kotelon maapisteen välillä resonoivat näinkin voimakkaasti jopa pienillä kytkentätaajuuksilla.

BVR-arvot laskettiin prosentuaalisesti jakamalla akselin peak to peak -jännite yhteismuotoisella peak to peak -jännitteellä ja lopputulos kerrottiin sadalla yhtälön 5 mukaisesti. Laskennassa käytettiin pitkän ajan peak to peak -arvoja, joilla saatiin kaikkein luotettavin tulos.



Kuva 53. Laakerijännitesuhteet on vertailtu taajuuden ja taajuusmuuttajan mukaan.

Vanhemman 132SMB 4-moottorin BVR-arvoksi saatiin noin 5,5–14 % taajuusmuuttajasta riippuen. Uuden 160MLB 4-napaisen moottorin vastaavaksi arvoksi saatiin noin 7,5–14 % riippuen käytetystä taajuusmuuttajasta. Taajuusmuuttajalla 3 saatiin kummasakin tilanteessa korkeammat laakerijännitesuhteet. Taajuusmuuttaja vaikutti siis BVR-arvojen laskentaan. Kapasitanssimittauksissa huomattiin kytkentätaajuuden vaikuttavan moottorin sisäisiin kapasitansseihin. Eli todennäköisesti taajuusmuuttajan kytkentätaajuus sekä itse taajuusmuuttajan toimintaperiaate vaikuttavat suoraan myös laakerijännitesuhteeseen koneen sisäisten kapasitanssien kautta. Pylväsdiagrammista huomataankin BVR-arvojen noudattavan kapasitanssimittausten linjaa, eli korkeammalla kytkentätaajuudella saadaan suuremmat laakerijännitesuhteet kuin myös kapasitanssiarvot tähtipisteen ja kotelon maapisteen välillä. Kyseinen teoria on esitetty kappaleen 2.2.3 yhtälössä 5.

Näiden perusteella voidaan siis olettaa uuden koneen olevan hieman herkempi akselijännitteille kuin vanhempi kone. Tämän perusteella BVR-arvon alentamiseen voitaisiin keskittyä, jos halutaan pienentää akselijännitteitä. Koneiden väliseen eroon BVR:n suhteen mahdollisia syitä ovat työssä aiemmin mainitut ilmavälin pienentäminen, eristeiden vähentäminen ja urageometria. Kyseisiin toimenpiteisiin keskittymällä kapasitansseja koneen sisällä pystytään pienentämään ja näin ollen vaikuttamaan myös laakerijännitesuhteeseen. Alentamalla laakerijännitesuhdetta, pystytään suoraan verrannollisesti vaikuttamaan myös akselijännitteiden tasoihin.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Diplomityöni tarkoituksena oli pureutua pienten oikosulkumoottoreiden laakerivirtoihin. Työssä käytiin tarkasti läpi laakerijännitteiden ja virtojen syntymistä ja niiden syitä, ratkaisuja näihin ongelmiin ja testattiin uuden ja vanhan mallisen koneen eroja laakerivirroissa. Mittausten pohjalta vertailtiin myös kolmen taajuusmuuttajan välisiä eroja.

Laakerivirtoja synnyttää vaihtovirtakoneen staattorin indusoima, koneen sisäinen yhteismuotoinen jännite. Yhteismuotoinen jännite on vaihejännitteiden summa tietyllä ajanhetkellä. Heilahteluja yhteismuotoisessa jännitteessä saa aikaan taajuusmuuttajien syöttämän kolmivaihejännitteen epäsymmetria. Tämä potentiaaliero akselin ja maan välillä purkautuu laakerivirtapulsseina akselista runkoon laakerin läpi. Virtapulsit aiheuttavat laakerin kehällä hitsausilmiön, jonka seurauksena pieni metallimäärä sulaa voiteluaineeseen lämmön vaikutuksesta. Tämä mikrokraateri kerää ympärilleen lisää kuoppia, jonka seurauksena laakeri vaurioituu lopullisesti jonkun ajan kuluttua. Laakerivirrat ovat palanneet taajuusmuuttajien tulon jälkeen. Ongelma saatiin jo aikojen saatossa poistumaan moottorin sähköisen rakenteen muokkauksella, mutta taajuusmuuttajien nopeat taajuusvaihtelut palauttivat ongelman. Nopeat taajuuden muutokset luovat suuriakin virtapulsseja aiheuttaen sähköistä räsitusta laakereihin.

Perusratkaisuja laakerivirtaongelmaan löytyy kolme. Monijohdinkaapelit, lyhyt impedanssireitti ja suuritaajuiset maadoituskytkennät pitäisivät olla perustoimenpiteitä kaikille moottoreille ja varsinkin laakerivirtaongelmista kärsiville koneille. Näiden perustoimenpiteiden lisäksi ongelmaan on kehitetty useita muita lisäratkaisuja. Ennen ratkaisuun päätymistä tulee kuitenkin tietää laakerivirran syntymissyys, jotta voidaan käyttää oikeaa menetelmää. Lisämenetelmistä tässä työssä on esitelty akselin maadoitus, hybridilaakerit, laakerin eristys, eristävä kytkin, laakerin voitelu, sähköstaattinen suoja ja suodattimet. Väärällä ratkaisumenetelmällä tilanne pysyy ennallaan tai saatetaan jopa pahentaa ongelmaa. Yleisesti voidaan todeta kaikkien lisäratkaisujen aiheuttavan ylimääräisiä kustannuksia ja heikentävän koneen toimintaa. Parhaat tulokset moottorivalmistajan näkökulmasta saataisiinkin muokkaamalla koneen rakennetta niin, että laakerijännitesuhdetta saataisiin pienemmäksi.

Seuraavana työssä siirryttiin testien tekemiseen ja tuloksien tulkitsemiseen. Testien aloittaminen oli hyvin työlästä ja aikaa pelkkiin valmisteluihin kuluikin useita kuukausia. Lopulta testit saatiin kuitenkin tehtyä ja tulokset ovat oikeanlaisia ja sen suuntaisia kuin epäiltiin. Vanhan- ja uudenmallisia moottoreita vertailtiin testien pohjalta. Työni tarkoituksena oli testata uuden- ja vanhanmallisten koneiden eroja laakerivirtaongelmissa. Testissä vertailtiin ABB:n uutta alumiinirunkoista konetta sekä vanhaa Stömbergin aikaista alumiinirunkoista konetta, jolloin pystyttiin vertaamaan moottorin välisiä eroja akselijännitteiden suhteen. Testejä varten moottoreiden laakerit eristettiin nylonholkkien avulla, jolloin akselijännite pystyttäisiin mittaamaan runkoa vasten. Moottorit ajettiin lämpimiksi, jotta voiteluaineen lämpötila sekä moottorin lämpötila olisivat vakiot. Moottorin lämpötila varmistettiin mittaamalla termistoreista.

Taajuusmuuttajatestien pohjalta huomattiin eri valmistajien taajuusmuuttajien välillä olevan eroja. Taajuusmuuttajan haitat laakerivirtojen osalta tunnetaan jo ja tiedetään, että nopeat taajuuden vaihtelut aiheuttavat jännitepulsseja akselin ja rungon välille. Mittauksissa käytettiin kolmea eri taajuusmuuttajaa, joissa kahdessa kytkentätaajuutena oli 3 kHz ja yhdessä 10 kHz. Kytkentätaajuudella on merkitystä akselijännitteiden tasoon, mutta kokeilun perusteella itse laitteen toimintaperiaate vaikutti enemmän akselijännitteen suuruuteen. Tätä kokeilua mitattiin alentamalla taajuusmuuttajan 3 kytkentätaajuudeksi 3 kHz. Vaikutus akselijännitteeseen oli mitätön. Laitteiden toimintaperiaate siis vaikuttaa myös suoraan akselijännitteisiin.

Koneiden välille saatiin varsin suuria eroja. Käytössä ollut uudempi moottori synnytti huomattavasti suurempia akselijännitepulsseja kuin vanhempi moottori. Myös kapasitanssi mittauksissa päädyttiin samaan lopputulokseen. Huolestuttavaa uuden koneen kapasitanssimittauksissa oli, että kapasitanssien suurimmat arvot saatiin niillä taajuuksilla missä nykyisten taajuusmuuttajien kytkentätaajuudet liikkuvat. Pahin alue mittausten pohjalta olisi 10 kHz ja 30 kHz välillä. Vanhemmassa moottorissa ”kapasitanssiippiikki” oli hieman suuremmilla taajuuksilla, noin 50 kHz kohdalla. Vertailun vuoksi mainittakoon, että taajuusmuuttajan 3 kytkentätaajuus on 10 kHz.

Teorian tueksi tarkasteltiin myös hieman moottoreiden laakerijännitesuhdetta. Laakerijännitesuhde pitäisi olla konekohtainen ja kuvata akselijännitteen ja yhteismuotoisen jännitteen suhdetta. Sen perusteella voidaan päätellä kuinka paljon yhteismuotoisen jännitteen heilahtelut vaikuttavat akselijännitteeseen. Mittauksiemme perusteella laakerijännitesuhde kuitenkin muuttuu taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden mukaan. Tätä laakerijännitesuhteen muutosta pyrittiin pohtimaan kapasitanssimittausten pohjalta. Kapasitanssimittauksissa tähtipisteen ja kotelon maapisteen kapasitanssi resonoikin merkittävästi tietyllä taajuusalueella. Tämä resonointi aiheuttaa koneen sisäisissä kapasitansseissa eroavaisuutta, joka näkyy laakerijännitesuhteen muutoksena eri kytkentätaajuuksilla.

Uuden koneen laakerijännitesuhteeksi saatiin noin 7,5–14 % pitkänajan peak to peak arvoista laskettuna, kun vanhan koneen vastaava arvo oli 5,5–14 %. Suuruuteen vaikuttavat taajuusmuuttajan korkeataajuiset vaihejännitteen kytkeytyvät. Koneiden väliseen eroon se ei kuitenkaan vaikuta, vaan todennäköisiä selityksiä ovat ilmavälin pienentäminen suhteessa pinta-alaan, uraeristeiden vähentäminen ja urageometria. Kyseisillä toimilla normaalisti nostetaan moottorin hyötysuhdetta, mutta taajuusmuuttajakäytöissä korkeilla kytkentätaajuuksilla ne ovat erittäin haitallisia akselijännitteiden osalta. Kapasitanssit koneen sisällä ovat pieniä, joten koneen muutosten ei tarvitse olla suuria vaikuttaakseen kapasitansseihin. Kääminpäiden ja urien eristetietoja ei vanhasta koneesta ollut, mutta epäilyksen pohjalta niiden vähentäminen saattaa aiheuttaa suurempia kapasitanssiarvoja varsinkin käämityksen tähtipisteen ja maan välille. Todennäköisesti parhaat tulokset akselijännitteiden pienentämisessä saavutetaan vaikuttamalla BVR-tasoon ja sisäisten kapasitanssien resonoimiseen kytkentätaajuuden mukaan sekä yhteismuotoisen jännitteen suodattamisella.

Sisäisten kapasitanssien resonoiminen kytkentätaajuuden mukaan voisikin olla hyvä jatkotutkimuksen aihe. Mikä siis aiheuttaa koneen sisäisten kapasitanssien resonoimisen uusissa koneissa jo pienemmillä kytkentätaajuuksilla? Suodattimilla pystytään vähentämään yhteismuotoisen jännitteen tasoa ja nousunopeutta, mutta millä keinoin itse moottoriin vaikuttamalla saadaan samanlaiset hyödyt?

LÄHDELUETTELO

ABB Oy. *Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä*. Tekninen opas nro 5. [online] Saatavana internetistä: <URL: <https://library.e.abb.com/public/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopasnro5.pdf>>.

ABB Oy (2009). *Sähkömoottoreiden hyötysuhteella on väliä*. [online] Saatavana internetistä:<URL: <http://www.abb.fi/cawp/seitp202/9324577570fc2313c125765e002bfcd2.aspx>>.

ABB drives Oy (2009). *Hardware manual du/dt filters*. [online] Saatavana internetistä: <URL: https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwjy2rG_kdLMAhVBCCwKHQ7bCvcQFggZMAA&url=https%3A%2F%2Flibrary.e.abb.com%2Fpublic%2F27abbad6a8bb5672c125763b0031ff9d%2FEN_AOCH_NOCH_HW_G.pdf&usq=AFQjCNGIK2e9-7QILD1i6WZcrvbV8z9hWA&sig2=h8WvhrZhXG0F-LgvDkQq0g&bvm=bv.121658157,d.bGg&cad=rja>.

ABB Oy (2014). ABB:n sisäinen tietokanta.

Ahola, Jero (2011). *Taajuusmuuttajaohjattujen sähkömoottorikäyttöjen laakerivirrat ja niiden mittaaminen*. Opetusmateriaali. 37 s. [online] Saatavana internetistä: <URL:https://www.google.fi/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj63_7fuajJAhUBXCwKHxm_BB8QFggdMAA&url=https%3A%2F%2Fnoppa.lut.fi%2Fnoppa%2Fopintojakso%2Fbl50a0600%2Fmateriaali%2Ftamu_ohjattujen_sahkokayttojen_laakerivirrat.pdf&usq=AFQjCNG7Wyow9OINeeKiZ18qD6_afVJ1FA&cad=rja>.

Hammar, Tuomo (1997). *Oikosulkumoottorin suuritaajuisten laakerivirtojen eliminointi*. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 90 s. Sähkötekniikan koulutusohjelma.

- Hietalahti, Lauri (2011). *Muuntajat ja sähkökoneet*. Tampere: Amk-kustannus Oy Tammertekniikka. 130 s. ISBN 978-952-5491-72-2.
- Hoppler, R., Errath, R.A. (2007). Motor bearings, not just a piece of metal. *Cement Industry Technical Conference Record*, 2007, 214 - 233.
- Iisakkala, J., Hammar, T., Ollila, J., Tuusa, H. (1997). On the bearing currents in medium power variable speed AC drives. *Electric machines and drives conference*, IEEE International, MD1/1.1 - MD1/1.3.
- Iisakkala, Jarkko (1996). *Oikosulkumoottorin laakerivirrat taajuusmuuttajakäytöissä*. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 82 s. Sähkötekniikan koulutusohjelma.
- Jokinen, Tapani (2009). *Paperikoneen sähkökäytön tarina, Tekijät muistelevat*. Saarijärvi: Saarijärven Offset Oy. 299 s. ISBN 978-952-92-6586-2.
- Kanninen, Jarno (2011). *Laakerivirrat kestomagneettitahtikoneissa*. Opinnäytetyö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 84 s. [online] Saatavana internetistä: <URL: http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/72664/Kanninen_Jarno%20Dipl.pdf?sequence=3>.
- Kolehmainen, Jere (2013). *Pyörivät sähkökoneet*. Kurssimateriaali. Vaasa: Vaasan yliopisto. Julkaisematon.
- Kuusinen, Janne (2014). *Maasulkuvirtojen tutkiminen kaivosteollisuuden sähkökäytöissä*. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. 68 s. [online] Saatavana internetistä: <URL: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22474/kuusinen.pdf?sequence=1>>.
- Lappeenrannan Laakerikeskus Oy. *Laakeri: vaurioiden tunnistus ja ehkäisy*. [online] Saatavana internetistä: <URL: <http://www.laakerikeskus.fi/laakerivaurio.html>>.

- Muetze, Annette (2004). *Bearing Currents in Inverted-Fed AC-Motors*. Väitöskirja. Darmstadin yliopisto. Sähkö- ja informaatiotekniikan tutkimusosasto. [online] Saatavana internetistä: <URL: <http://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/dissertationen/dissannette.pdf>>. 250 s.
- 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*, IEEE International, 274–278.
- Mäki-Ontto, Petri (2006). *Modeling and reduction of shaft voltages in AC motors fed by frequency converters*. Väitöskirja. Teknillinen korkeakoulu. Sähkö- ja Tietoliikennetekniikan osasto. 140 s.
- NMB. *What is a ball bearing?* [online] Saatavana internetistä: <URL: <http://www.nmbtc.com/bearings/white-papers/what-is-a-ball-bearing/>>.
- Oh, William, Willwerth, Adam (2008). *Shaft Grounding – A Solution to Motor Bearing Currents*. [online] Saatavana internetistä: <URL: http://www.est-aegis.com/ASHRAE_Paper-Shaft%20Grounding-A_Solution_To_Motor_Bearing_Currents.pdf>. 251 s.
- Pekola, Jari (1998). *Laakerivirrat IGBT-taajuudenmuuttajilla*. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Diplomityö. 86 s. Sähkötekniikan koulutusohjelma.
- PSK 7708 (2004). *Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Akselijännitteen ja -virran mittaaminen*. Helsinki, PSK Standardointiyhdistys ry. 13 s.
- Pyrhönen, Juha (1995). *Pyörivän sähkökoneen suunnittelu*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 279 s. ISBN 951-763-868-X.
- Pyrhönen, Juha (2005–2006). *Sähkökäytöt*. Luentomateriaali. Lappeenranta: Lappeenranta teknillinen yliopisto. Julkaisematon.

- Salminen, Asko. *Taajuusmuuttajakäyttöjen laakerivirtoja voidaan välttää*. Fläkt Woods. [online] Saatavana internetistä: <URL: <http://www.flaktwoods.fi/yrityksemme/asiakaslehti/2f950ca9-9360-44eb-af6c-054c85411850>>.
- Schiferl, R.F., Melfi, M.L., Wang, J.S. (2002). Inverter driven induction motor bearing current solutions. *Petroleum and Chemical Industry Conference, Industry Applications Society 49th Annual*, 67–75.
- Ström, J. –P. (2009). Active du/dt filtering for variable-speed AC drives. *Power Electronics and Applications, EPE*, 2009, 1–10.
- Särkimäki, Ville (2009). *Radio frequency measurement method for detecting bearing currents in induction motors*. Väitöskirja.
- Tavner, P.J. (2008). Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *Electric Power Applications, IET*, 215–247.
- Tervola, Janne (2006). *Varmista vaihteen kestoikä mittaamalla*. Tekniikka & Talous. [online] Saatavana internetistä: <URL: <http://www.tekniikkatalous.fi/metallitekniikka/2006-10-11/Metallitekniikka-102006-3263088.html>>.
- Väisänen, Juha (2014). *Laakerivirtojen mittaaminen pumppukäytöissä*. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. Sähkövoimatekniikka. [online] Saatavana internetistä: <URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77684/Vaisanen_Juha.pdf?sequence=1>. 43 s.