



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Sasu Viitiö

OIKOSULKUMOOTTORIN KUNNONVAL- VONNAN MITTAUKSET

BillerudKorsnäs Finland Oy

Sähkötekniikka
2022

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Sasu Viitiö
Opinnäytetyön nimi	Oikosulkumoottorin kunnonvalvonnan mittaukset
Vuosi	2022
Kieli	suomi
Sivumäärä	92 + 5 liitettä
Ohjaaja	Marko Iskala

Sähköisten signaalien mittaaminen ja tulkitseminen on kehittynyt paljon tietokonetekniikan ja digitaalisen käsittelyn ansiosta. Oikosulkumoottoreiden sähköisillä mittausten menetelmillä on mahdollisuus havaita sähköiset viat helpommin kuin esimerkiksi värähtelymittauksilla ja osa mekaanisista vioista on sähköisiin vikoihin liittyvää. Mittauksien tarkoituksena on havaita oikosulkumoottorien ennenaikainen vikaantuminen ennen kuin vikaantuminen keskeyttäisi prosessia.

Opinnäytetyössä käydään läpi teoriaa vikojen aiheuttajista. Mittausmenetelmissä perehdytään nykyaikaisiin mittalaitteistoihin. Lisäksi selvitetään mittaustuloksien analysointia matemaattisesti. Lähtötietoina toimivat esimerkkimoottoreiden kilpiarvot ja moottoreista käynnin aikana mitatut arvot.

Mittaustuloksien yhteenvetona voidaan todeta, että mittauksissa päästiin tavoitteisiin. Akselijännitteen mittauksista voidaan havaita haitallisia korkeita jännitteitä moottorin akselilla. Tässä tapauksessa mittaukset voitiin suorittaa, vaikka kyseinen mittausten menetelmän käyttöä hankaloitti mittapäiden asentaminen käynnissä olevan prosessimoottorin akselille. Virtaspektri- ja magneettivuomittauksilla voidaan todeta roottorivaurioita. Kuten tuloksistakin voidaan todeta, tulkintaa hankaloittaa moottorin korkeataajuiset syöttövirrat sekä mekaaniset eritaajuusviat. Ylijännitemittauksien tulosten perusteella moottoreilla ei näkynyt suuria jännitepulsseja, jotka vahingoittaisivat käämien eristystä. Ylijännitemittaus ei kuulu sellaisenaan ennakoivaan huoltoon, sillä sen pohjalta ei voida arvioida käämien eristyksen kuntoa.

Avainsanat¹ oikosulkumoottori, kunnonvalvonta, virranspektrinmittaus, akselijännitemittaus, jännitemodulaatio- ja magneettivuomittaus

ABSTRACT

Author	Sasu Viitiö
Title	Condition monitoring measurements of short-circuit motors
Year	2022
Language	Finnish
Pages	92 + 5 Appendices
Name of Supervisor	Marko Iskala

Measuring electric signal and interpretation has advanced a lot because of digital processing and computer technology. Electrical measurement methods for short-circuit motors can detect electrical faults more efficiently than for example vibration measurements and some of the mechanical faults are related to electrical faults. The purpose of the measurements is to detect premature failure of the short-circuit motors before the failure interrupts the process.

The thesis reviews the theory of the causes of faults. In measurement methods, get acquainted with the modern measurement equipment and how to interpret the measurement results. In addition, examine mathematical analysis of the measurement results. The initial data are the nameplate values of the example motors and the values measured from the motors during process.

In summary, it can be stated that measurements met the targets. Shaft voltage measurement can detect harmful high voltages on the motor shaft. In this case the measurements could be accomplish, although the use of this measurement method was challenging by the installation of the probes on the shaft of the running process motor. Rotor damage can be detected by current spectrum and magnetic flux measurements. As can be seen from the results, the interpretation is complicated by the high-frequency supply currents of the motor and mechanical frequency faults. Based on the results of the overvoltage measurements, in the motors did not appear any large voltage pulses that would damage the insulation of the windings. Overvoltage measurements is not part of preventive maintenance, as it not possible to measure the condition of the winding insulation based on overvoltage measurement.

Keywords short-circuit motor, condition monitoring, current spectrum measurement, voltage shaft measurement, voltage modulation measurement and magnetic flux measurement

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

JOHDANTO.....	12
1 MITTAUSMENETELMÄT	13
1.1 Akselijännite- ja virtamittaukset.....	13
1.1.1 Indusoituvan virran aiheuttajat.....	13
1.1.2 Kapasitiivisen virran aiheuttajat.....	17
1.1.3 Laakerivirtojen tekijät ja estäminen	18
1.1.4 Mittaukset ja dokumentointi	21
1.2 Magneettivuo.....	23
1.2.1 Käämitykset ja magneettikenttä	24
1.2.2 Pyörivän magneettivuon indusoima SMJ.....	27
1.2.3 Magneettivuo mittaus	29
1.2.4 Vaikutukset ja eliminoiminen.....	30
1.2.5 Magneettivuon mittaus tulkinta ja huomioitavat asiat.....	30
1.3 Käynnin aikainen staattorivirran spektrin mittaus	32
1.3.1 Signaalien esittäminen FFT- ja DFT-muunnos	32
1.3.2 Staattorivirran signaalianalyysi.....	35
1.3.3 Roottori sauvavirran tunnistaminen	35
1.3.4 Mittaus ja huomioitavat asiat	40
1.4 Liitinjännitekäyttöönottomittaus taajuusmuuttaja käyttöisessä moottorissa	43
1.4.1 Ylijännite taajuusmuuttajakäytössä ja jännitepulssin heijastuminen	43
1.4.2 Johtojen aalto-ominaisuudet ja aallon heijastuminen kuormituksessa	45
1.4.3 Ylijännitteen vaikutus ja kompensointi moottoreihin	48

1.4.4	Liitinjännitemittaus PWM-taajuusmuuttajakäyttöisellä moottorilla	53
2	MITTALAITTEET	56
2.1	Fluke Motor drive analyzer 550	56
2.1.1	Moottorin akselijännite-, jännitemodulaatiomittaus.....	56
2.2	AMS CSI 2130	58
2.2.1	Moottorin virtaspektri ja magneettivuo mittauksien asetukset .	59
2.2.2	Mittapäät ja adapterit.....	60
3	MITATTAVAT KOHTEET	62
3.1	Sakeamassasihti	62
3.2	Tyhjiöpumppu 10	63
3.3	Jäähdytysvedensyöttöpumppu.....	64
3.4	Tyhjiöpumppu 7	65
4	MITTAUSTULOKSET JA ANALYYSI	66
4.1	Akselijännitemittaukset.....	66
4.1.1	Päätelmät ja analyysi	66
4.2	Virtasignaalin- ja magneettivuomittaustulokset	71
4.2.1	Päätelmät ja analyysi	71
4.3	Jännitemodulaatiomittaus.....	81
4.3.1	Jännitemodulaatio mittaustulokset.....	82
4.3.2	Päätelmät ja analyysi	88
	LÄHTEET	90
	LIITTEET	93

KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1. Akselivirran ja -jännitteen aiheuttajat magneettisen epäsymmetrian takia	13
Kuva 2. Suorakäytöllä ja PWM-invertterin käyrät	15
Kuva 3. Jakaantuneet kapasitanssit käämityksen ja moottorin rungon välillä	16
Kuva 4. Laakerivirtojen syntyminen taajuusmuuttajakäytöissä.....	16
Kuva 5. Välipiiri sekä invertterin piiri	17
Kuva 6. Laakerivirtojen aiheuttamaa ”pyykkilautaa” kuviota.....	18
Kuva 7. Valokaaresta johtuvat ikääntyminen.....	19
Kuva 8. Laakerivirta eri kaapelityypeillä.....	20
Kuva 9. Asennettu dU/dt suodatin invertterin lähdön puolelle.....	20
Kuva 10. Mittaus kohdat ja maadoitusten tarkistukset.	21
Kuva 11. Vasemmanpuoleisessa piirroksessa näkyy magneettivuon kulkureitti ja oikeanpuoleisessa staattorin ja roottorin uritukset	24
Kuva 12. Kulkuvirrat kahdella napaparillaluvulla	25
Kuva 13. Staattorin urat jaoteltu eri vaiheille.	26
Kuva 14. Vaiheen indusoima mmv ja vuo.	26
Kuva 15. Kolmen vaiheen mmv ja ilmavälivuo.	27
Kuva 16. Vuontiheys käämissä eri ajan hetkillä.....	28
Kuva 17. Aksiaalinen magneettivuonmittaus.....	29
Kuva 18. Mitattava kohde Pietarsaaren paperitehtaalla.....	31
Kuva 19. Magneettivuon mittaustulokset missä näkyy sivunauhoja syöttötaajuuden ympärillä	32
Kuva 20. FFT-muunnoksen esitys matriisimuodossa.....	34
Kuva 21. 4-napainen magneetikenttä neljällä runkopilarilla.....	38
Kuva 22. Periaate f_{brb}, h komponenttien induktion takana staattorin virrassa perusaaltona, viidentenä ja seitsemäntenä.	39
Kuva 23. Staattorivirran spektri.....	40
Kuva 24. Mittaus virtamuuntajan toisiopiiristä Pietarsaaren paperitehtaalla.....	42
Kuva 25. Yksivaiheissijaiskytkentä	44

Kuva 26. Pulssin eteneminen moottorin kaapelissa.....	45
Kuva 27. Moottorin käämien lävitse jännitepulssin etenemisreaktio.....	48
Kuva 28. Vilskekäämitys ja muotovyhtikäämitys.....	49
Kuva 29. Tyhjiöt eristyksissä.....	50
Kuva 30. Jännitteen huippuarvo rajoitettu 684 V du/dt suodattimella 40 V/μs. .	51
Kuva 31. Sinisuodin	52
Kuva 32. Sinisuotimen käyttö jännitteenmuuntajan kanssa.....	53
Kuva 33. Ylijännitepiikkejä esiintyy jännitteessä heijastumisen takia.....	54
Kuva 34. Mittaustulos liitinjännitemittauksesta.	54
Kuva 35. Akselijännitemittaus	57
Kuva 36. Fluke MDA-550	58
Kuva 37. Vuokela	60
Kuva 38. Virtapihtimittari ja CSI Dual Volts Adapter	61
Kuva 39. TP10 Akselijännitemittaus invertteriohjattu.....	69
Kuva 40. TP7 Akselijännitemittaus suorakäyttöinen	69
Kuva 41. Mittajohdin ilman maadoitusta	70
Kuva 42. Maadoitettu mittajohdin	70
Kuva 43. TP10 Virtaspektrin mittaustulos taajuusalueella 0–200 Hz suuremmalla kuormalla ja teholla	71
Kuva 44. Jättämästä lasketut sivunauhataajuudet.....	73
Kuva 45. Korkean sivunauhan amplitudi.....	74
Kuva 46. TP10 Virtaspektrin mittaustulos taajuusalueella 0–200 Hz pienemmällä kuormalla ja teholla	75
Kuva 47. <i>fbrb, h</i> 5. harmonisen yliaallon mittaustulokset.....	76
Kuva 48. <i>fbrb, h</i> 7. harmonisen yliaallon mittaustulokset.....	76
Kuva 49. <i>fbrb, h</i> 11. harmonisen yliaallon mittaustulokset.....	77
Kuva 50. <i>fbrb, h</i> 13. harmonisen yliaallon mittaustulokset.....	77
Kuva 51. Magneettivuon mittaustulos matalataajuus 87 % kuormalla	79
Kuva 52. Magneettivuon mittaustulos korkeataajuus 87 % kuormalla.....	79
Kuva 53. Tyhjiöpumppu 10 87 % kuormalla ja 79.74 % teholla	80

Kuva 54. Tyhjiöpumppu 10 60 % kuormaa ja 34.89 % teholla	80
Kuva 55. Tila 1 vaiheesta vaiheeseen mittaus.....	82
Kuva 56. Tila 2 vaiheesta vaiheeseen mittaus.....	83
Kuva 57. Tila 3 vaiheesta vaiheeseen mittaus.....	83
Kuva 58. Tila 1 Jäähdytysveden syöttöpumppu vaiheesta maahan mittaus.	84
Kuva 59. Tila 2 Jäähdytysveden syöttöpumppu vaiheesta maahan mittaus	85
Kuva 60. Tila 3 Jäähdytysveden syöttöpumppu vaiheesta maahan mittaus	85
Kuva 61. LA15 Sakeamassasihti 1 tila 1 vaiheesta vaiheeseen mittaus	86
Kuva 62. LA15 Sakeamassasihti 1 tila 2 vaiheesta vaiheeseen mittaus	87
Kuva 63. LA15 Sakeamassasihti 1 tila 3 vaiheesta vaiheeseen mittaus	87
Kuva 64. ABB Maksimi sallittu vaiheesta vaiheeseen jännitepulssit	89
Taulukko 1. Toimenpiteet laakerivirtojen ennaltaehkäisyyn.....	22
Taulukko 2. Toimenpiteet laakerivirtojen ennaltaehkäisyyn.....	23
Taulukko 3. Roottori vaurion arviointi	41
Taulukko 4. Johtimen eristyksien ominaisarvot	46
Taulukko 5. Sakeamassasihdin nimikilpiarvot.....	62
Taulukko 6. Tyhjiöpumpun 10 nimikilpiarvot.....	63
Taulukko 7. Jäähdytysveden syöttöpumpun nimikilpiarvot.	64
Taulukko 8. Tyhjiöpumpun 7 nimikilpiarvot.....	65
Taulukko 9. Jännitepulssien haitallisuus asteet laakereille.....	68
Taulukko 10. Suorakäyttöisen haitallisuusasteet laakereille.	68
Taulukko 11. Jättämästä lasketut sivunauhataajuudet.	73
Taulukko 12. $f_{brb,h}$ harmonisten yliaaltojen mittaustulokset lasketulla taajuudella.....	78
Taulukko 13. Esimerkki taulukko jännitemodulaatiomittaustuloksista.....	81
Taulukko 14. Jäähdytysveden syöttöpumpun vaiheesta-vaiheeseen mittaustulokset.....	84
Taulukko 15. Jäähdytysveden syöttöpumpun vaiheesta-maahan mittaustulokset.	86

Taulukko 16. Sakeamassasihti 1 nimikilpiarvot.....	88
--	----

LIITELUETTELO

LIITE 1. Sakeamassasihdin 1 taajuusmuuttajan parametrit.

LIITE 2. Sakeamassasihdin piirikaavio.

LIITE 3. Tyhjiöpumpun 10 piirikaavio.

LIITE 4. Jäähdytysvedensyöttöpumpun moottorin arvot ja säätötapa.

LIITE 5. Jäähdytysveden syöttöpumpun piirikaavio.

Lyhenteet ja symbolit

ω	kulmataajuus (rad/s)
\bar{B}_p	kokonaismagneettikentätiheys
BB_f	rikkinäisen roottorisauvan indikaattori
N_{AV}	keskiarvo dB amplitudina
V_{shaft}	akselijännite
a_e	absoluuttinen erotus
f_{BB}	sivunauhataajuudet
$f_{brb,h}$	rikkinäisen roottorisauvan harmoniset virta komponentit
f_{osc}	vääntömomentin ja tehon heilahtelu
f_{osc}	vääntömomentin ja tehonheilahtelun taajuus
f_s	syöttötaajuus (suorakäyttöisillä koneilla)
f_{sb}	sivunauhataajuudet
$\hat{\phi}_m$	vyyhden lävistäjän vuon huippuarvo
AC	Alternating Current (Vaihtovirta)
BVR	Bearing Voltage Ratio
DC	Direct Current (Tasavirta)
DFT	Discrete Fourier Transform
D-pää	käyttöpää
EDM	Electric-Discharge Machining (Sähkökipinätyöstö)
E_v	vaiheeseen indusoitunut jännite
FFT	Fast Fourier Transform
IGBT	Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGB-transistori)
m	vaiheluku
mmv	magnemotorinenvoima
N-pää	vapaa pää
PE	Protective Earth (Suojamaa)
PWM	Pulse Width Modulation (Pulssin Leveys Modulaatio)
s	jättämä

smj	sähkömotorinen jännite
smv	sähkömotorinen voima
STFT	Short-Time Fourier Transform
V/EU	Volts per Engineering Unit
ρ_h	moottorinheijastuskerroin
f	taajuus
p	napapariluku

JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantaja on BillerudKorsnäs Finland Oy Pietarsaaren tehdas. Pietarsaareissa yhtiö valmistaa voima- ja säkkipaperia sekä muita kehittyneitä korkean suorituskyvyn paperilaatuja. Pietarsaaren tuotteita käytetään erityisesti vaativiin teknillisiin sovelluksiin, kuten esim. hiomapapereihin sekä rulla- ja rullauspapereihin.

Opinnäytetyössä on tarkoitus perehtyä yrityksen oikosulkumoottorien kunnonvalvonnan tarpeellisuuteen sekä tarvittaviin mittalaitteistoihin. Työssä tarkastellaan myös mittalaitteiston hankinnan kannattavuutta. Selvitetään, saadaanko ennakoitua helposti kyseisellä laitteella tietyt viat. Tämän avulla saataisiin minimoitua tuotannon pysähtymiset. Käydään myös läpi oikosulkumoottorin kunnonvalvonnan mittaustavan teoria ja käytännön menetelmä, jota hyödynnetään mittaustulosten keräämiseen ja analyysiin.

Oikosulkumoottorien kunnonvalvonnan opinnäytetyössä on 4 erilaista kohdetta, joille toteutetaan suurin osa mittauksista. Jännitemodulaatio mittauksella mitataan invertteriohjattujen oikosulkumoottorien jännitepulssien amplitudi ja nopeus, minkä avulla saadaan tietoon kestääkö käämien eristyksen kyseistä pulssia. Akselijännitemittauksella saadaan tietoon, mikäli jännite ylittää laakerin voiteluaineen eristyksen. Staattorin virtaspektri sekä magneettivuo mittauksella saadaan tietoon roottorin kunto, mikäli päätyrenkaassa ja/tai roottorin sauvoissa vaurioita.

1 MITTAUSMENETELMÄT

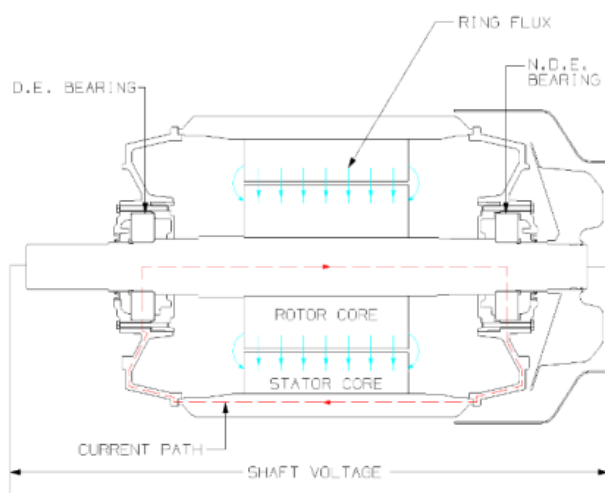
Oikosulkumoottorin kunnonvalvonnassa on käytössä neljä erilaista mittaustapaa, joita ovat akselijännitemittaukset, magneettivuomittaukset, staattorin virtaspektri- ja jännitemodulaatiomittaukset. Käsitellään myös teoreettista osuutta ja tarvittavat matemaattiset laskut sekä ongelmien ratkaisua.

1.1 Akselijännite- ja virtamittaukset

Akselijännite- ja virtamittauksia tehdään, jotta voidaan ennakoida kulkuvirtojen syyt helpommin vastatoimien suorittamiseksi ja paikallismittauksilla pystytään osoittamaan niiden tehokkuuden. Kappaleessa käydään läpi kapasitiivisen sekä indusoituvan virran teoriasta, jolla on isoin merkitys invertteri käyttöisiin moottoreihin. Käydään myös läpi, kuinka ennaltaehkäistä kyseiset laakerivirrat.

1.1.1 Indusoituvan virran aiheuttajat

Roottori ei ole koskaan keskitetty staattorin kanssa ja magneettikenttä ei ole koskaan täydellisen symmetrinen. Pyörivä akseli aiheuttaa näin jännitteen akselia pitkin. (Gerd M.)



Kuva 1. Akselivirran ja -jännitteen aiheuttajat magneettisen epäsymmetrian takia

Kyseinen jännite riippuu moottorin koosta, akselin korkeudesta, ominaisvirrasta, pyöriävästä nopeudesta, napapari luvusta, ja mitä pienempi napapariluku niin se aiheuttaa enemmän epäsymmetriaa niiden magneettikentässä ja vuossa. Kaavasta (1) nähdään kuinka moottorin rungon koko vaikuttaa akselijännitteeseen. (Gerd M.)

$$BVR = \frac{u_b}{u_{cm}} = \frac{C_{sf}}{C_{sf} + C_{rf} + 2 \cdot C_b} \quad (1)$$

Missä,

C_b on laakerien kapasitanssi

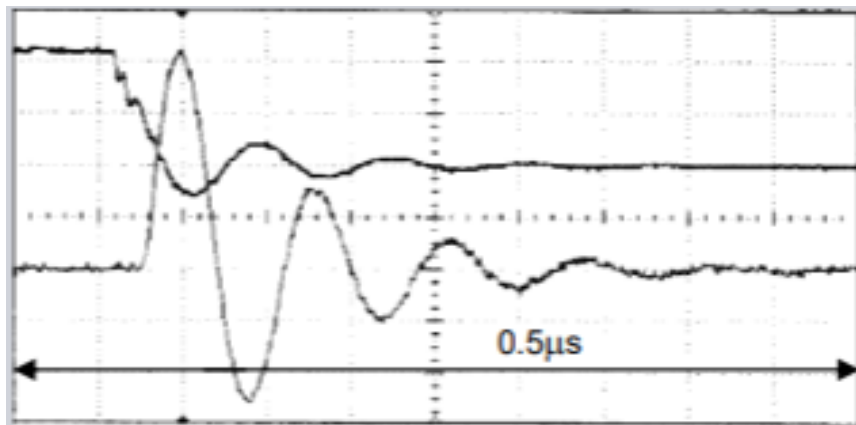
C_{rf} on roottorin rungon kapasitanssi

C_{sr} on staattorin ja roottorin kapasitanssi

C_{sf} on staattorin rungon kapasitanssi

Jos tämä kyseinen jännite on oikosulussa läpi laakerin, on havaittavissa matalataajuisia virtoja johtuen piirin matalasta vastuksesta. Matalataajuinen virta saadaan estettyä eristämällä laakeri moottorin N-päässä. Tämä on standardina invertteri käyttöisille moottoreille, jonka tilaajan täytyy tarkistaa. (Gerd M.)

Moottorin kytkentäjännitteet eroavat toisistaan riippuen siitä ohjataan moottoria suoraikäytöllä vai PWM-invertterillä. PWM-invertteri saa jännitteen käyrän muodon muuttumaan jyrkästi. Kytkentäjännite suoraikäytöllä on hallitumpi eikä jyrkkiä muutoksia ole. (Gerd M.) Kuvassa 2 korkea pulssiset käyrät ovat PWM-invertterin aiheuttamat ja tasaisempi käyrä tulee suoraikäyttöisellä moottorilla.

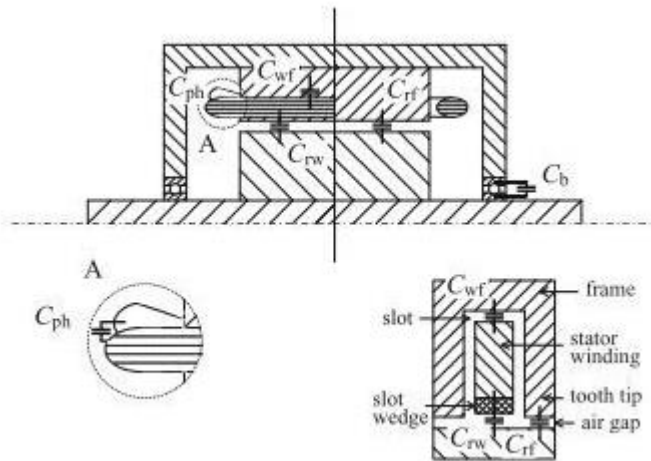


Kuva 2. Suorakäytöllä ja PWM-invertterin käyrät

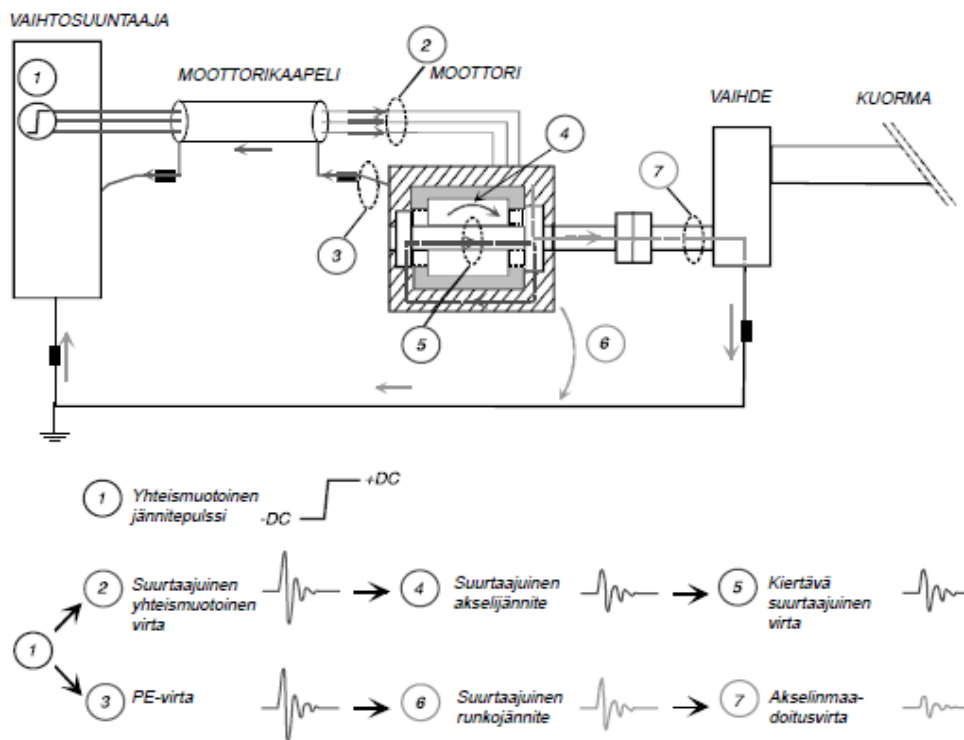
Jakaantuneet kapasitanssit käämityksen ja moottorin rungon välillä muodostavat korkeataajuisia virtoja staattoria kohti, jotka aiheuttavat hetkellistä vaihtelua magneettivuossa. Tämä voi saada aikaan myös akselijännitettä, jota voi muodostua, vaikka roottori on pysähtynyt, tämä voidaan laskea kaavalla (Gerd M.):

$$V_{shaft} = \frac{C_{sr}}{C_{rf} + C_b + C_{sr}} \cdot V_{com,S} \quad (2)$$

Jos tämä kyseinen jännite on oikosulussa läpi laakerin, on havaittavissa huomattavia suuritaajuisia virtoja, johtuen piirin matalasta impedanssista. Nämä virrat esiintyvät vain moottorilla, jota ohjataan PWM-invertterillä. Kuvasta 4 nähdään, että ilmenee kahdenlaisia laakerivirtoja, joita on kiertävä laakerivirta (5) ja ei-kiertävä laakerivirta eli akselin maadoitusvirta (7). (Gerd M.)



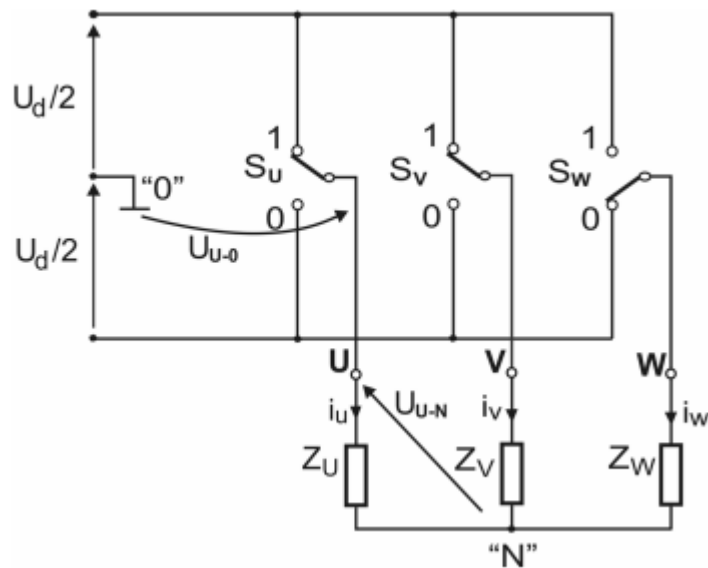
Kuva 3. Jakaantuneet kapasitanssit käämityksen ja moottorin rungon välillä



Kuva 4. Laakerivirtojen syntyminen taajuusmuuttajakäytössä

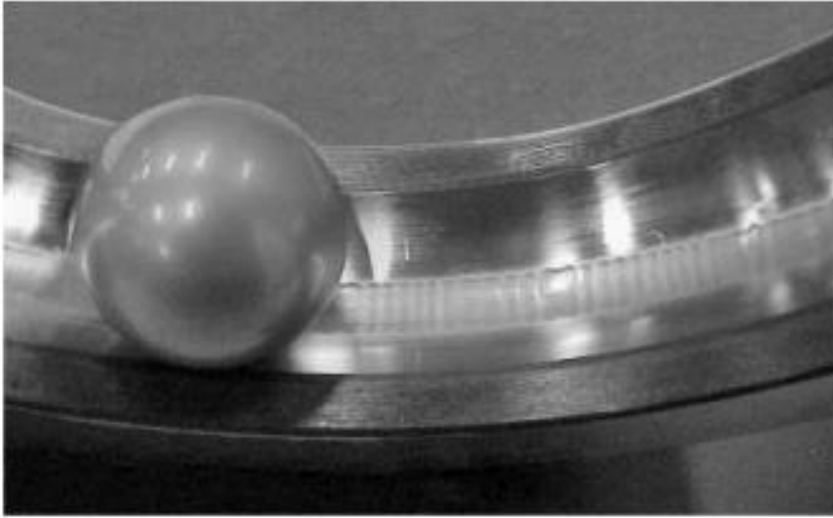
1.1.2 Kapasitiivisen virran aiheuttajat

Invertterin välipiirissä mikä muuttaa potentiaalia $+U_{dc}/2$ tai $-U_{dc}/2$, eli moottorin käämityksen keskipiste on $+U_{dc}/2$ tai $+U_{dc}/6$ tai $-U_{dc}/6$ tai $-U_{dc}/2$. Siniaaltosyötöisessä moottorin jännitteiden summa on aina nolla. Kapasitanssien yli kulkeutuva jännite ilmenee laakereissa. (Gerd M.)



Kuva 5. Välipiiri sekä invertterin piiri

Kyseiset jännitteet saavat aikaan rasvakalvon kulumisen ja roottorin kapasitanssin purkautumisen, jota kutsutaan kipinätyöstöksi. Verratessaan du/dt virtoihin kipinätyöstössä muodostuneet virrat eivät liity kytkentävaiheiden reunoihin, vaan kyseiset virrat muodostuvat kymmeniä mikrosekunteja myöhemmin. (Gerd M.)



Kuva 6. Laakerivirtojen aiheuttamaa ”pyykkilautaa” kuviota

1.1.3 Laakerivirtojen tekijät ja estäminen

Laakereiden voiteluun tarkoitettu rasva on johtamatonta. Mikäli eriste hajoaa, virta kulkee valokaaren muodossa läpi laakerin. Todella suuret lämpötilat valokaaren aikana polttavat rasvan laakereista. Tästä syystä hiiliyhdisteet yhdistyvät uudestaan jäljelle jääneen rasvan kanssa, jossa rasva muuttuu tässä tapauksessa mustaksi. Kyseinen ilmiö on esitelty kuvassa 7. (Kressbach, A.)



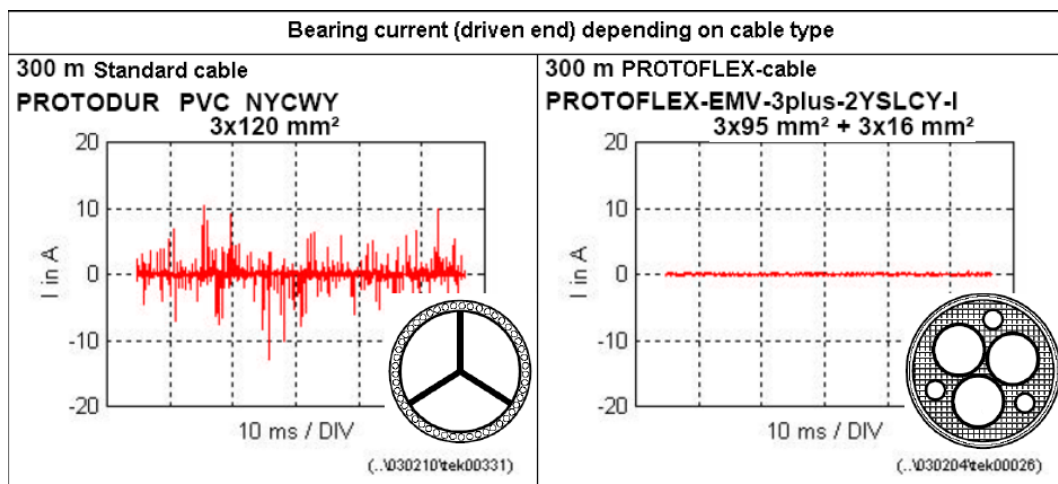
Kuva 7. Valokaaresta johtuvat ikääntyminen.

Kyseinen ilmiö on äkillisempää, jos virran tiheys tai kytkentätaajuus kasvaa. Toisenlaisia ei sähköisiä vaikuttavia ilmiöitä ovat laakereiden kuormitus, laakerinlämpötila ja roottorin nopeus. (A. Muetze, A. Binder, H. Vogel, and J. Hering)

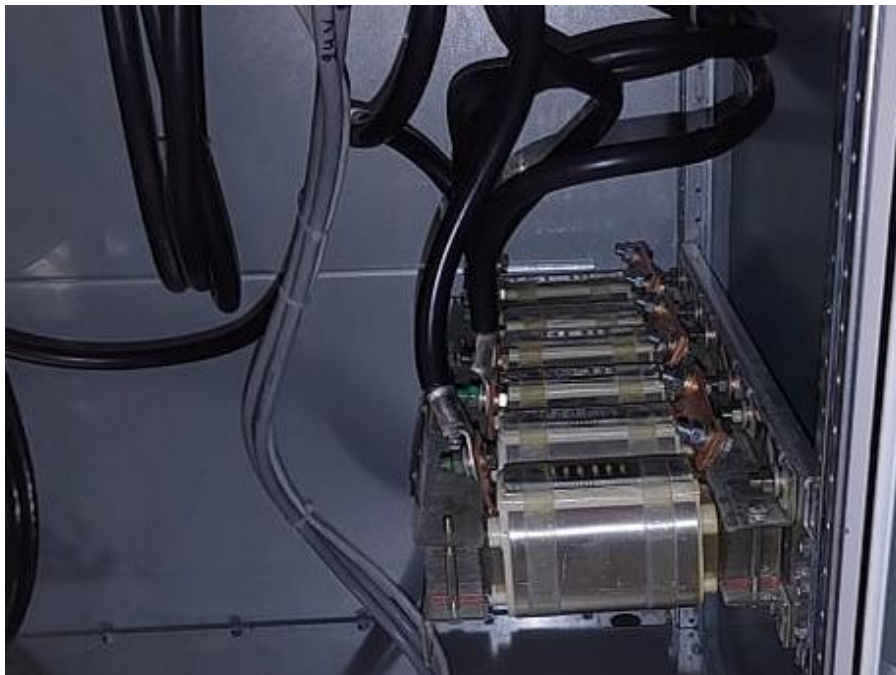
Laakerivirtojen kompensointiin vaikuttaa moottorin kaapelin tyyppi ja kytkennän laatu. Staattorin käämityksen ja staattorin kotelon keskeinen kapasitanssi on suurimmillaan moottorin sisällä, missä jännitteen nopea muuttuminen määrittelee virran harhailun kapasitanssin lävitse. (Gerd M.)

Mikäli maadoitusliitännän impedanssi ei ole tarpeeksi matala suurilla taajuuksilla, tästä aiheutuva jännitehäviö saa aikaan hajavirtojen kulkemisen laakereita ja moottorin akselia pitkin käytössä olevaa konetta kohden. Myös alhainen kaapelin kapasitanssi on hyödyksi, koska se rajoittaa moottorin hajavirtoja, mutta tekee kaapelista kalliimman. Kuva 8 kertoo, että kaapelin laadulla voi olla suurikin vaikutus laakerivirtojen kompensoimiseen. (Gerd M.)

Inverterin puolella harhavirtojen eliminoimiseen käytetään du/dt suodatinta tai voidaan myös sen sijaan käyttää siniaalto filttteriä. Du/dt suodattimen kanssa myös käytetään ferriittirenkaita, jonka lävitse vietään moottorin kaapelit, tai ferriittirenkaat asetellaan inverterin DC-välipiirin kytkennän ympärille. Ylimääräisen induktanssin kasvaminen rajoittaa virtaa, jota pakotetaan yhteismuotoisella jännitteellä. (Gerd M.)



Kuva 8. Laakerivirta eri kaapelityypeillä.

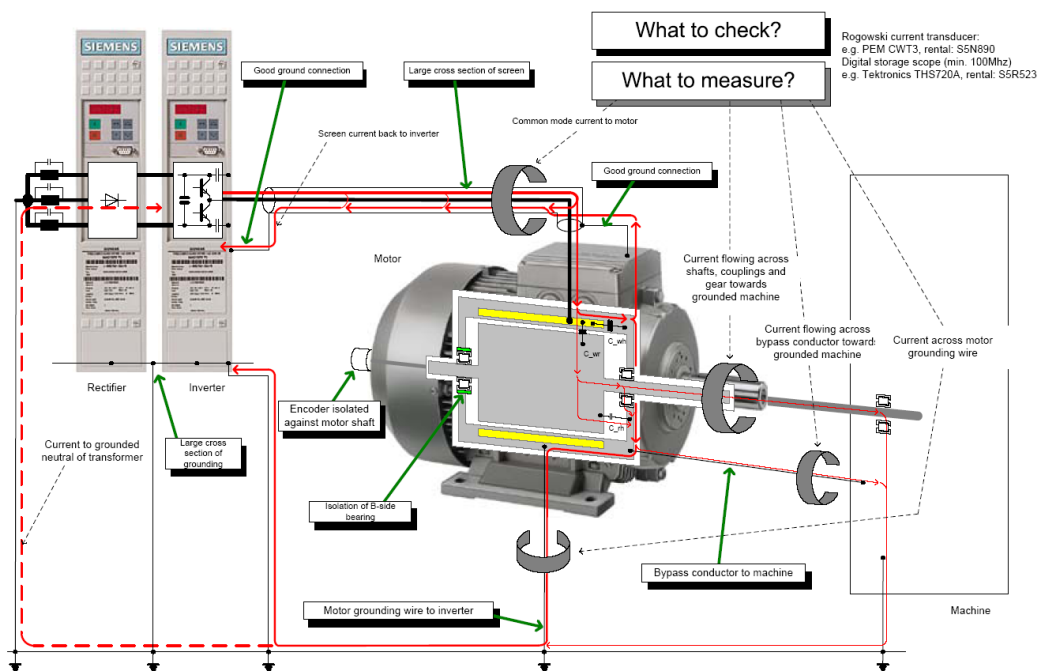


Kuva 9. Asennettu du/dt suodatin inverterin lähdön puolelle

1.1.4 Mittaukset ja dokumentointi

Hajavirtojen mittauksella paikan päällä voidaan todeta, että hajavirrat on ohjattu pois laakereista. Mittauksilla voidaan myös tarkistaa mikä hajavirtojen eliminoimisen menetelmä on tehokkain. Mittalaitteen kaistanleveys pitää huomioida, jossa se on oltava vähintään viidestä kymmeneen megahertsiin. (Gerd M.)

Mittauksessa tarkistetaan maadoitusten liitokset ja mitataan yhteismuotoinen virta moottorille. Tämän lisäksi mitataan virta, joka etenee akselia pitkin kytkimelle ja vaiheita pitkin maadoitettua konetta kohden. Virta etenee ohitusjohtimen poikki maadoitettua konetta ja moottorin maadoitusjohdinta kohti kuvassa 10. (Gerd M.)



Kuva 10. Mittaus kohdat ja maadoitusten tarkistukset.

Dokumentoinnissa olisi hyvä kirjata mitattu data ja verrata niitä samankaltaiseen käyttökoneistoon tai erilaiseen. Dokumentoidessa on muistettava myös kirjata mistä on mitattu ja ovatko mittaukset matalataajuisia tai korkeataajuisia mittauksia. (Gerd M.)

Taulukossa 1 ja 2 on esitelty, minkälaisia toimenpiteitä tehdään moottorille, johdotukselle tai invertterille. Minkä eri toimenpiteen avulla voidaan eliminoida magneettista epäsymmetrisyyttä, EDM, dU/dt virtoja. Esitellään mihin nämä vaikuttavat ja kuinka paljon nämä vaikuttavat. Myös neutraaleissa alueissa löytyvät U_{br} , jonka suuruus pitää olla huomattavasti pienempi kuin U_{brg} tai C_{iso} suuruus pitää olla huomattavasti pienempi kuin C_{brg} , että laakerien eristämällä olisi vaikutusta. (Gerd M.)

Taulukko 1. Toimenpiteet laakerivirtojen ennaltaehkäisyyn

Moottori							
	1 eristetty laakeria	2 eristettyä laakeria	Päällystetyt laakerit	Hybridi laakerit	Johtava rasva	Harjat	Faraday staattori
Magneettinen epäsymmetrisyys	Vaikuttaa	1 on tarpeeksi tehokas	Vaikuttaa	Vaikuttaa	Ei vaikutusta	Vain jos $U_{br} \ll U_{brg}$	Ei vaikutusta
EDM	Vain jos $C_{iso} \ll C_{brg}$	Vain jos $C_{iso} \ll C_{brg}$	Ei vaikutusta	Vaikuttaa	Vaikuttaa	Vaikuttaa	Runko Maadoitettu hyvin
dU/dt virrat	Vain jos $C_{iso} \ll C_{brg}$	Vain jos $C_{iso} \ll C_{brg}$	Ei vaikutusta	Vaikuttaa	Ei vaikutusta	Vaikuttaa	Ei vaikutusta
Tehokkuus	Korkea	Korkea	Matala	Korkea	Matala	Korkea	Matala
Huolto	Matala	Matala	Matala	Matala	Kohtalainen	Korkea	Kohtalainen
Hinta	Matala	Keski- verta	Matala	Korkea	Kohtalainen	Kohtalainen	Korkea
Hinta/laatusuhde	Hyvä	Kohtalainen	Kohtalainen	Kohtalainen	Korkea	Kohtalainen	Korkea

Taulukko 2. Toimenpiteet laakerivirtojen ennaltaehkäisyyn

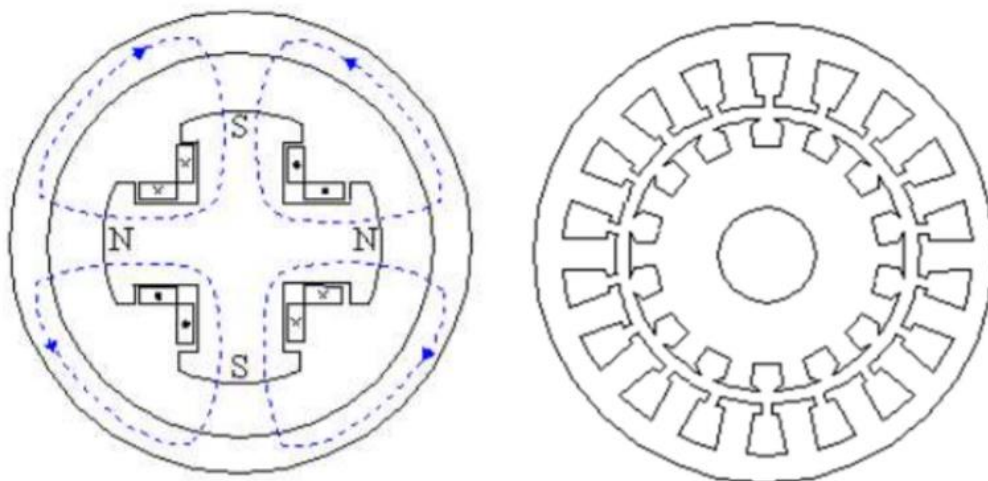
	Johdotus		Invertteri	
	Moottorin kaapelointi	Maadoitus kaapelointi	dU/dt filteri	Ferrite renkastukset
Magneettinen epäsymmetrisyys	Ei vaikutusta			
EDM	Vaikuttaa	Vaikuttaa	Vaikuttaa	Vaikuttaa
dU/dt virrat	Vaikuttaa	Vaikuttaa	Vaikuttaa	Vaikuttaa
Tehokkuus	Korkea	Korkea	Korkea	Korkea
Huolto	Matala	Matala	Matala	Matala
Hinta	Kohtalainen	Kohtalainen	Kohtalainen	Kohtalainen
Hinta/laatu suhde	Kohtalainen	Kohtalainen	Kohtalainen	Kohtalainen

1.2 Magneettivuo

Magneettivuo mittauksilla on tarkoitus löytää moottoreista epätasaisuutta, joka saattaa indusoida moottorin akselin suuntaisesti magneettisen aluevuon. Magneettivuo muodostaa staattorivirran roottoriin indusoituneen vuon, eli roottorin virtojen staattoriin indusoidun vuon.

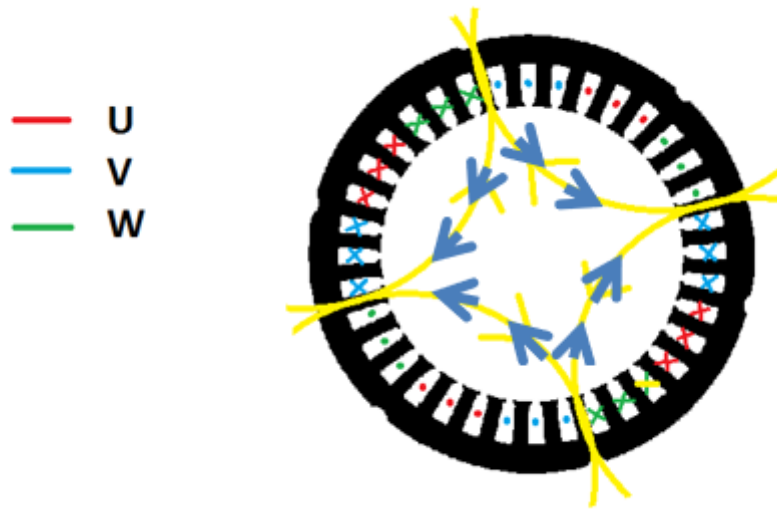
1.2.1 Käämitykset ja magneettikenttä

Oikosulkumoottorin käämien eristyksissä olevia sauvoja kutsutaan urassa olevia johtimiksi, missä johdin muodostuu kahdesta peräkkäisestä olevasta sauvasta. Käämityksessä on vyyhti, mitkä ovat käämin leveyden päässä toisistaan ja on yksinkertaisissa käämityksissä sijoitettu kahteen uraan, joka muodostaa tietyn lukumäärän johdinkierroksia. Urissa ja vyyhdessä on erilaisia eristyksiä, kuten johtimien eristys, uran seinämän eristys sekä ura-aukon eristys. Missä uran seinämän eristyksellä eristetään rautasydän vyyhteestä ja sulkuliuskilla tai urakiilalla suljetaan ura-aukot samalla tukien johtimia sekä estäen johtimien purkautumista. (Verkkonen V. 2017)



Kuva 11. Vasemmanpuoleisessa piirroksessa näkyy magneettivuon kulkureitti ja oikeanpuoleisessa staattorin ja rottorin uritukset

Jotta saataisiin pyörivä magneettikenttä niin virran on haaraututtava urissa niin että, yhdellä napapari luvulla virrat ovat aina erisuuntaiset eri staattorinpuolik-
kailla. Kahdella napapariluvulla virrat ovat aina erisuuntaiset eri staattorin neljän-
neksillä, peräkkäisillä neljänneksillä on aina erisuuntaiset virrat. Mitä suurempi na-
papariluku, sitä pienemmän alueen urissa kulkeva virta muodostaa. (Verkkonen V.
2017)



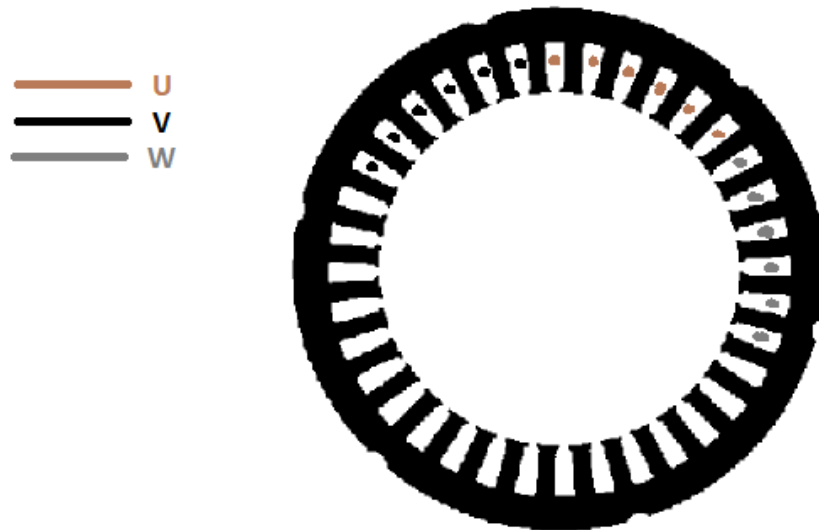
Kuva 12. Kulkuvirrat kahdella napaparillaluvulla

Esim. kuvassa 13 staattorin uraluku on 36, missä vyyhti käyttää kahta sivua urissa, napapareja on yksi ja vaiheita on kolme. Vakoluku saadaan laskemalla käyttämällä kaavaa (3). (Verkkonen V. 2017)

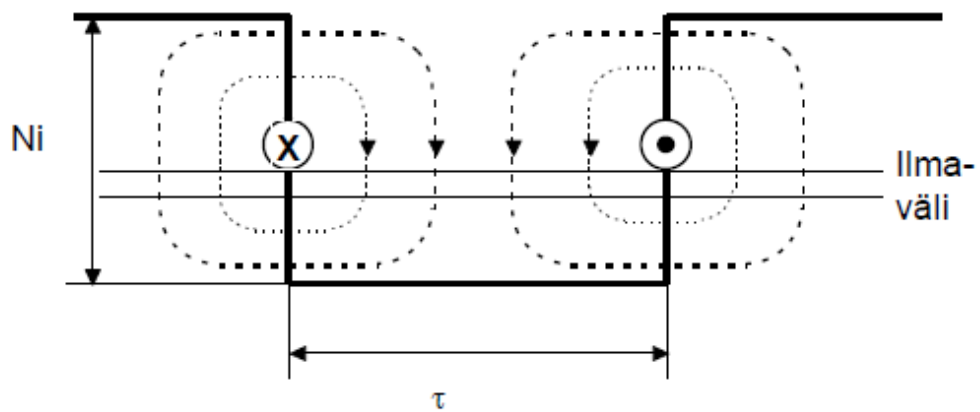
Staattorin vakoluku saadaan kaavalla:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} \quad (3)$$

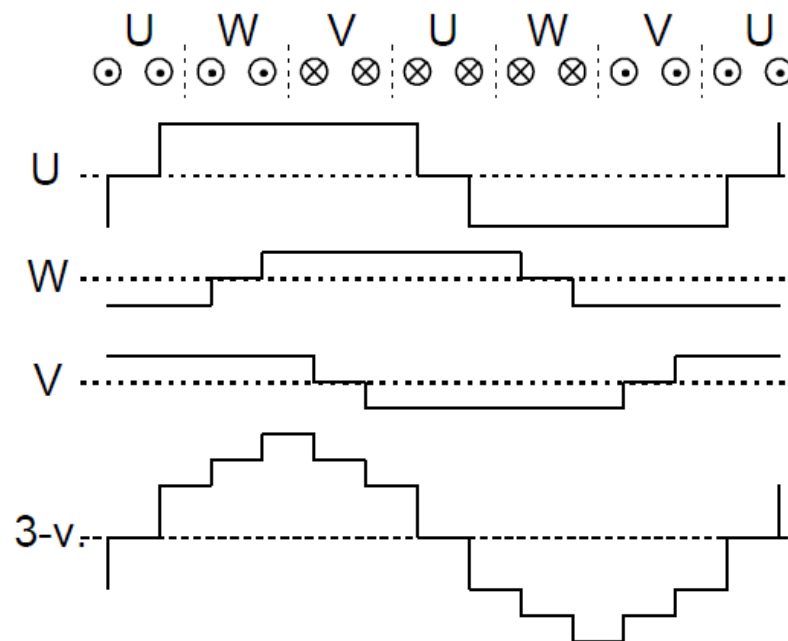
Käämin indusoituvan vuon arvioidaan hajaantuvan tasaisesti ilmavälissä. Kuvasta 14 voidaan nähdä yhden vaiheen indusoima mmv ja vuo. Kolmesta vaiheesta muodostuu kuvan 15 vastaava mmv. Johon vakoluvun suuruus vaikuttaa, mitä suurempi vakoluku niin saavutetaan puhtaampaa sinikäyrää, koska porrastus kolmi-vaiheisessa mmv:ssä pienenee. (Verkkonen V. 2017)



Kuva 13. Staattorin urat jaoteltu eri vaiheille.



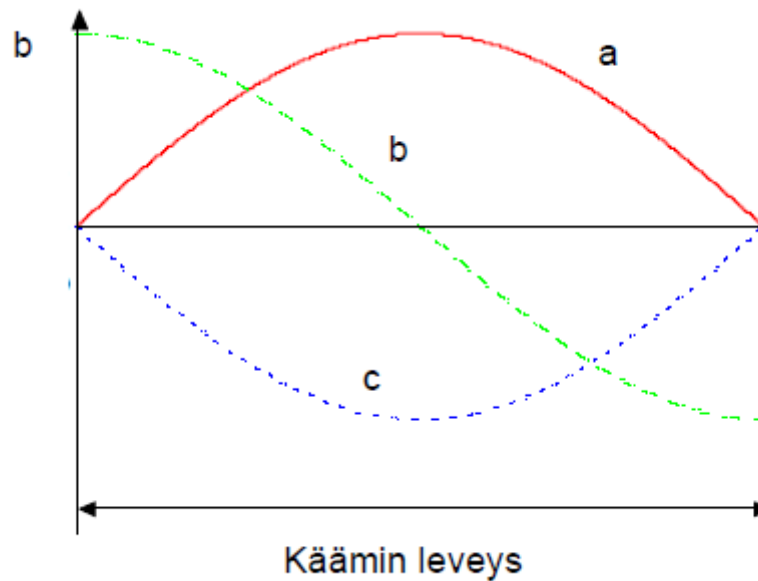
Kuva 14. Vaiheen indusoima mmv ja vuo.



Kuva 15. Kolmen vaiheen mmv ja ilmvälivuo.

1.2.2 Pyörivän magneettivuon indusoima SMJ

Käämiin aiheutuu vaihteleva vuo, missä pyörivä magneettikenttä etenee käämin suhteen. Vuontiheys ajatellaan sinimäisenä, josta voidaan tarkastaa perusaallon vaikutusta. Kuvassa 16 tuodaan ilmi tapahtuma, jossa kokonainen vuon positiivinen puolijakso a, on käämin sisällä. Tällöin vuon laajuus on parhaimmillaan, mikä on käämin pinta-ala kertaa vuontiheyden aritmeettinen keskiarvo. Tapahtumassa b vuontiheyden positiivinen ja negatiivinen puolijakso ovat yhtä laajat, mikä aiheuttaa vuon suuruudeksi nollan. Vuo c taas on suurimmillaan negatiivisessa tilassa. (Verkkonen V. 2017)



Kuva 16. Vuontiheys käämissä eri ajan hetkillä.

Jännitteen indusoituessa saadaan samankaltainen tapahtuma kuin muuntajalla, missä käämin lävitse vaihteleva vuo muuttuu rautasydämen sisällä. Molemmissa ilmiöissä vuo vaihtelee ajan funktiona ja jännite indusoituu Lenzin lain perusteella.

Analysoidakseen ainoastaan vuon perusaaltoa, vaihekäämissä muuttuva vuo on sinimäistä niin voidaan kirjoittaa lauseke: (Verkkonen V. 2017)

$$\phi_{mv} = \hat{\phi}_m \sin(\omega t) \quad (4)$$

Lenzin lain mukaan saamme:

$$e_v = N_1 \frac{d\phi_{mv}}{dt} = N_1 \omega \hat{\phi}_m \cos(\omega t) = N_1 \omega \hat{\phi}_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

Smj:n tehollisarvoksi saamme:

$$E_v = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} N_1 f \hat{\phi}_m = 4,44 N_1 f \hat{\phi}_m \quad (6)$$

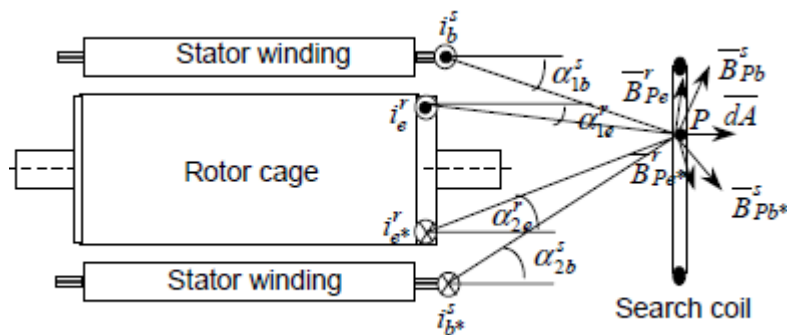
Yhtälö on voimassa, jos vyyhden sivu on aseteltu yhteen yksittäisen uraan ja käämin leveys on napajaon mittainen. Käämitystä nimitetään silloin halkaisijakäämi-

tykseksi. E_v aiheuttaa vastajännitteen verkonjännitteelle, joka aiheuttaa staattorin yli menevää jännitehäviötä. Lähdejännite indusoituu roottorissa, mikä tuottaa roottorivirran. (Verkkonen V. 2017)

1.2.3 Magneettivuo mittaus

Magneettikentän kokonaistiheys koneen ulkopuolella oleva piste P voidaan kirjoittaa kahden magneettikentän tiheyden \vec{B}^s_{Pb} ja \vec{B}^r_{Pe} summana, saadaan kaavalla:

$$\vec{B}_P = \sum_b \vec{B}^s_{Pb} + \sum_e \vec{B}^r_{Pe} \quad (7)$$



Kuva 17. Aksiaalinen magneettivuonmittaus

Mittauksien saatavista tuloksista on mahdollista havaita, jos roottori sauvoissa tai roottorin päätyrenkaassa on viallisuutta sekä jos staattorikäimityksessä on kierrosoikosulku. Aksiaalisen magneettivuon spektrin mittauksesta saadaan tietoa roottorin kunnosta ja sen taajuuskomponentti voidaan laskea kaavalla (CSI (1997) Motor View Software Manual):

$$f_{RF} = f_s \pm 2p \frac{f_s}{p} - \frac{f_s}{p(1-s)} \quad (8)$$

Mittauksesta voidaan myös tutkia korkea harmonisia yliaallon voimakkuuksia, jotta saadaan erotettua muu epäsymmetria rikkinäisistä sauvoista. Ilmavälin vuon olevien taajuuksien avulla, mikä saadaan kaavalla (G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott M. W. Maiden):

$$f_{BB} = f_s \frac{k}{p} (1 - s) \pm s \quad (9)$$

1.2.4 Vaikutukset ja eliminoiminen

Vuon altistuessaan suurelle vuonmuutoksen kohdalle sauvan vuo, josta nähdään vuon porrasmaisuus. Altistuessa indusoitunut jännite ja sauvaan suuntautunut voima muuttuvat nykyksenomaisesti. Kyseistä ilmiötä saadaan heikennettyä urien vinoudella, siten osa sauvaa on korkean vuomuutoksen alueella. Sekä staattorin ja roottorin uralukujen valitsemisella heikennetään vaikutusta. Oikeanlaisilla uralukujen valitsemisella vältetään tapahtuma, missä useaan sauvaan kohdistuisi yhtäaikainen voiman muutos, jossa yhtäaikainen voiman muutos sauvoissa saa aikaan tärinää ja ylimääräistä ääntä. (Verkkonen V.)

1.2.5 Magneettivuon mittaus tulkinta ja huomioitavat asiat

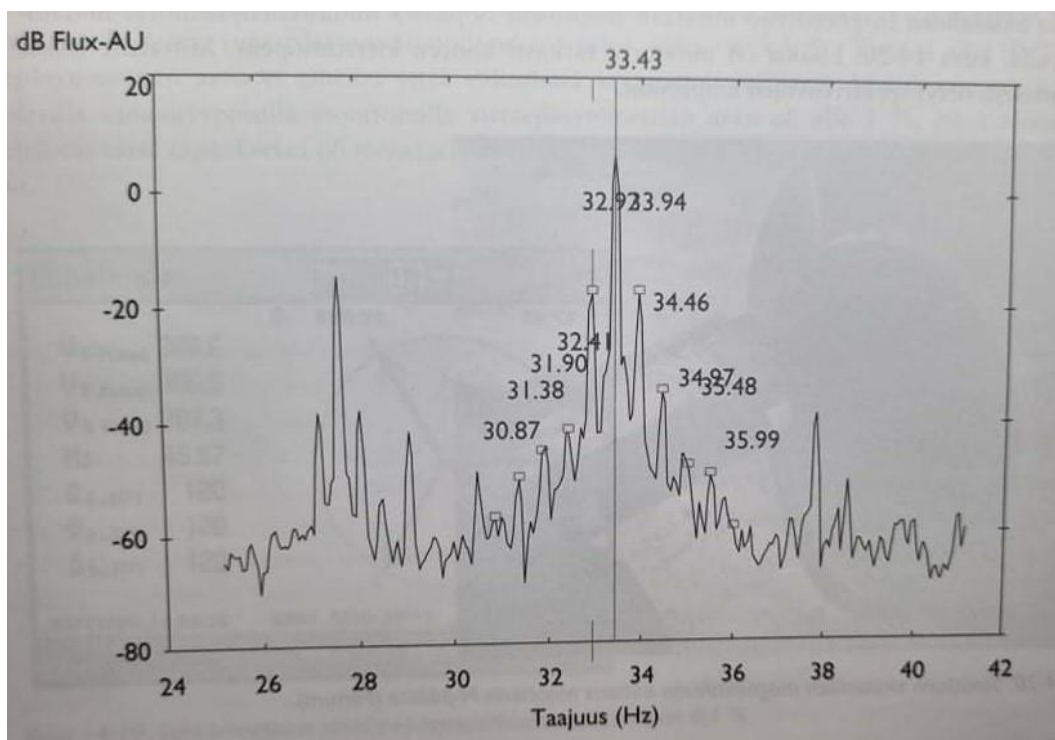
Roottorin kunto mitataan oikosulkumoottorin aksiaalisella magneettivuon mittauksella, mikä mitataan N-päästä mittausanalyysoittorin ja siihen liitettävällä vuokelalla. Alla olevassa kuvassa 18 tehdään magneettivuomittaus moottorille.



Kuva 18. Mitattava kohde Pietarisaaren paperitehtaalla

Mittauksessa on huomioitava moottorin kierrosnopeus. Moottorissa aiheutuu jättämää, minkä takia se lisää roottorisauvavian mahdollisuutta. Staattorivirran tietty taajuus on verrannollinen jättämään. Kyseinen virta muodostaa identtiset taajuudet aksiaalisessa hajavuossa tai aksiaalinen hajavuon taajuuden aiheuttaa staattorivirta tietyllä taajuudella, jotka ovat saman taajuisia. Johon tarvitaan erikoisvalmistettu vuokela mitataksaan magneettivuon. (Mikkonen H., Miettinen J., Leinonen P., Jantunen E., Kokko V, Riutta E., Sulo P., Komonen K., Lumme V-E., Kautto J., Heinonen K., Lakka S., Mäkeläinen R. 2019)

Mittauksissa tarkastellaan sivunauhojen magneettivuon amplitudia, missä laskeaan sivunauhan ja syöttötaajuuden amplitudin erotus. Kuvassa 19 on esimerkki moottorin magneettivuon mittaustuloksista. Paras ja luotettavin tapa on mitata oikosulkumoottorin magneettivuota, koska korkeat taajuudet syöttövirroissa saattavat häiritä mittaustuloksia. (Kokko ym. 2019, 399–400)



Kuva 19. Magneettivuon mittaustulokset missä näkyy sivunauhoja syöttötaajuu-
den ympärillä

1.3 Käynninaikainen staattorivirran spektrin mittaus

Staattori virtaspektrin mittauksen tarkoituksella on löytää epätahtikoneen jättämästä liittyen muodostamia roottorisauvavikojen lisääntymisiä, tietynlaiselle taajuudelle ja mikä on suhteellinen jättämään. Mikäli roottorisauva on vahingoittunut, voidaan todeta käytön aikana staattorivirran spektrin mittaamisella ja sivunauhojen tarkastelulla.

1.3.1 Signaalien esittäminen FFT- ja DFT-muunnos

Signaaleja voidaan myös esittää aikataason lisäksi usein taajuustasossa, missä voidaan tarkastella signaalin värähtelyn eri komponentit. Jotta taajuussisältö voidaan saada esille, muutetaan signaali Fourier-muunnokseksi. (Miettinen, J & Jantunen, E. 2019, 190.)

Fourier sarja on sini- ja kosinifunktioilla koottu summa, jolla saadaan kuvailtua jaksollisia funktioita kuten värähtelyä. Funktiolla on syklinen funktio missä jakson mukaan voidaan saada funktion perustaajuus ja peruskulmataajuus selville vastavasti: (Jokinen K.)

$$f = \frac{1}{T} \quad (10)$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} \quad (11)$$

Fourier-sarjassa on vapaasti valittava syklinen funktio, joka kirjoitetaan sinimuotoisen perusaallon sekä monikertojen sarjana. Sarjakehitelmästä voidaan saada täsmällisempiä lukemia. Sarjakehitelmässä on runsaammin haalittu termejä, jolla saadaan täsmällisempiä tuloksia ja päinvastoin mitä vähemmän termejä niin epätäsmällisempiä tuloksia. (Verkkonen V. 2018)

Fourier-sarja saadaan laskettua kaavalla:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + \dots$$

$$b_0 + b_1 \cos(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) + \dots \quad (12)$$

Funktiossa keskiarvoa esittävä termi on ensimmäisenä ja termit missä viitataan alaindeksillä 1 esittää perusaaltoa esim. kaavassa (12). Missä muut termit esittävät yliaaltoja, minkä taajuudet ovat kerrannaisia perusaaltoa kohden. (Verkkonen V. 2018)

Keskiarvo a_0 saadaan laskettua kaavalla:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \text{ jossa } x = \omega t \quad (13)$$

Diskreetti Fourier-muunnos mittaa ajan suhteen jaksollisesti, jotka ovat käytännön puolella tietyn pituisia jaksoja. DFT-muunnoksella mittaus tuottaa paljon laskutoimituksia, joka suorittaa muunnoksen mittalaitteessa tai tietokoneohjelmistolla. (Miettinen, J & Jantunen, E. 2019, s. 191) Muunnos voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$G(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} dt \quad (14)$$

FFT-muunnoksella voidaan saada hyötyjä irti monella tapaan ja niiden välisillä eroilla. Käyttäjän on hyvä tietää suunnilleen, kuinka FFT-algoritmi toimii, että ymmärtäisi paremmin laitetta soveltaessa ja sen rajoituksia.

Kaavassa (3) $e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}$ kuvailee FFT-matriisissa yksikkövektoria erilaisissa asentokulmissa, missä aikatason näytepisteiden lukumäärä muuttavat kyseisiä vektoreita. Asentokulmaksi todetaan jakamalla aikatason näytepisteiden lukumäärällä kokonaisen jakson ajan kulman suhteen. Esim. $360^\circ/8 = 45^\circ$. Kaava (14) esittää kuvassa 20 matriisimuotoa, missä eri asennoissa esitetään yksikkövektoreita. (Miettinen, J & Jantunen, E. 2019, 195)

$$\begin{bmatrix} G_0 \\ G_1 \\ G_2 \\ G_3 \\ G_4 \\ G_5 \\ G_6 \\ G_7 \end{bmatrix} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow & \uparrow \\ \uparrow & \nearrow & \rightarrow & \searrow & \downarrow & \swarrow & \leftarrow & \nwarrow \\ \uparrow & \rightarrow & \downarrow & \leftarrow & \uparrow & \rightarrow & \downarrow & \leftarrow \\ \uparrow & \searrow & \leftarrow & \nearrow & \downarrow & \swarrow & \uparrow & \nwarrow \\ \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow & \uparrow & \downarrow \\ \uparrow & \swarrow & \rightarrow & \nwarrow & \leftarrow & \rightarrow & \leftarrow & \rightarrow \\ \uparrow & \nwarrow & \leftarrow & \swarrow & \downarrow & \swarrow & \leftarrow & \swarrow \\ \uparrow & \nearrow & \leftarrow & \nwarrow & \downarrow & \swarrow & \leftarrow & \swarrow \end{bmatrix} \begin{bmatrix} g_0 \\ g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \\ g_5 \\ g_6 \\ g_7 \end{bmatrix}$$

Kuva 20. FFT-muunnoksen esitys matriisimuodossa.

1.3.2 Staattorivirran signaalianalyysi

Staattorivirran analysoinnissa pitää olla hyvä mittausresoluutio n. 80–100 dB. Mittaus signaalia muunnetaan yleisesti taajuustasoon. Sähkökoneita, joita kuormitetaan likimäärin vakiona mittauksen aikana, niissä tilanteissa voidaan käyttää FFT-muunnosta. Mittauksissa kannattaa huomioida taajuusalue ja spektriviivojen lukumäärä, jotta erityyppiset vikatilanteet saataisiin tunnistettu. Erilaiset vikatilat tarvitsevat erilaisen taajuusalueen niiden tunnistamiseen ja taajuusalueet voidaan jakaa spektrin avulla. (Kokko ym. 2019, 386–396.)

Roottorinsauvavian tunnistamiseen 50 Hz syötöllä tarvitaan taajuusalueeksi 0–200 Hz ja voidaan mitata 0.1 Hz resoluutiolla, jotta saadaan tarkempi taajuusanalyysi. Spektriviivojen määrällä jaetaan sitten taajuusalue, mitä enemmän spektriviivoja sitä tarkemmin voidaan analysoida tuloksia, mutta pitää huomioida mitä mitataan ja että on oikeat asettelu arvot. Spektriviivojen lukumäärä saadaan jakamalla taajuusalue resoluution kanssa. (Kokko ym. 2019, 386–396.)

Yleisesti mittaus aika on kymmeniä sekunteja mittalaitteen laskiessa mittauksen amplitudia, riippuen mittalaitteen asettelujen tarkkuudesta mittaus voi kestää useita kymmeniä sekunteja. (Kokko ym. 2019, 386–396.)

1.3.3 Roottori sauvavian tunnistaminen

Roottoriensauvat väsyvät mitä enemmän moottoria käynnistetään, mikä voi aiheuttaa säröjä, sauvojen katkeamisen ja pahimmassa tapauksessa päätyrenkaan hajoamisen. Roottorin kuntoa voidaan tarkastella mittaamalla staattorin vaiheen virta spektri. Vikaantumisen saadaan selville parhaiten staattorin virtamittauksella, koska se on alttiimpi. Roottorisauvavika muodostuu moottorin jättämästä, mistä aiheutuu kasvua staattorivirran taajuuksiin. (Kokko ym. 2019, 386–396.)

Jättämä saadaan laskettua kaavalla:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (15)$$

Kaavalla voidaan laskea sivunauhojentaajuudet:

$$f_{BB} = f_s \frac{k}{p} (1 - s) \pm s \quad (16)$$

Joka voidaan yksinkertaistaa muotoon:

$$f_{sb} = f_s (1 \pm 2s) \quad (17)$$

Kaavaa tulkittaessa voidaan todeta, että sivunauhataajuudet elävät jättämän noustessa tai pienentyessä.

Voidaan myös muuntaa sivunauhat absoluuttiseksi ja laskea niiden erotus sekä keskiarvo lineaarisesti, kaavalla:

$$a_e = \frac{\left\{ 10^{\left(\frac{-f_{sb}}{20}\right)} + 10^{\left(\frac{+f_{sb}}{20}\right)} \right\}}{2} \quad (18)$$

Kaavassa absoluuttinen erotus ja niiden keskiarvo taas muunnetaan takaisin, jotta saadaan keskiarvo desibeleinä kaavalla:

$$N_{AV} = 20 \left\{ \log_{10} \left(\frac{1}{a_e} \right) \right\} \quad (19)$$

Magneettivuon ja staattorivirran yhteisistä vaikutuksista, kasvaa vääntömomentti ja tehon heilahtelu seuraavasti:

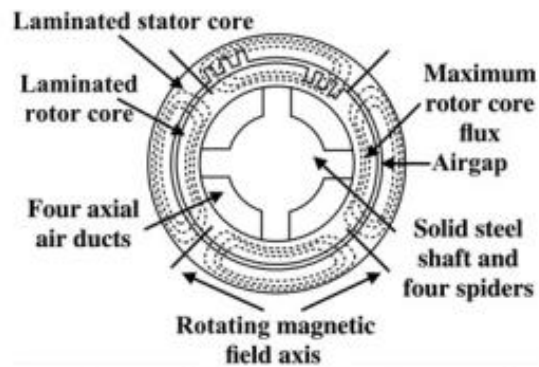
$$f_{osc} = 2sf_s \quad (20)$$

Voidaan myös laskea missä aliarvioidaan häkkikäämityksen virheellisyyttä ja vaurioita, mutta voidaan myös tehokkaasti käyttää indikaattorina rikkinäisten roottorisauvojen vakavuusasteena. Kaavassa pitää huomioida, että teollisuuden induktiomootoreiden suunnittelutiedot eivät ole välttämättä saatavilla, joten yksityiskohtaiset teoreettiset ennusteet eivät välttämättä ole toteutettavissa. (Thomson & Culbert ym. 2017. Kappale 4, s. 94–95.)

Roottorisauva vaurion arviointi lasketaan kaavalla:

$$BB_f = \frac{2R}{(10^{\left(\frac{N_{tai} N_{AV}}{20}\right)} + 2p)} \quad (21)$$

On myös huomioitava vääränlaiset positiiviset tulokset, jossa $2p = S_p$ toteutuu. Tutkimuksessa William T. Thomson suoritti tutkimusstrategiansa, jossa hän suoritti kokeita moottorilla eri kuormilla, missä toteutuu $2p = S_p$. Kokeissa todettiin, että $\pm 2sf$ sivunauhojen suuruus prosentteina tulovirrasta kevyellä kuormalla on suurempi kuin niiden suuruus tulovirrasta täydellä kuormalla. (Thomson, W.T. 1992)



Kuva 21. 4-napainen magneettikenttä neljällä runkopilarilla

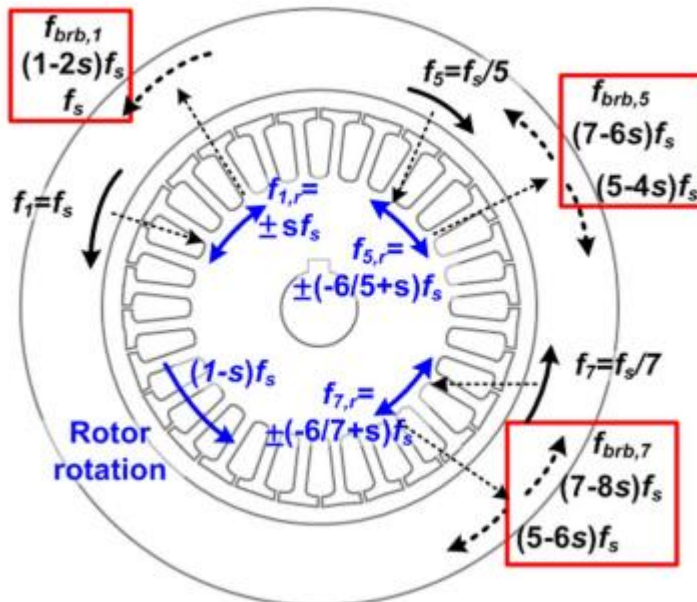
Vuonna 2015 Chanseung Yang ehdotti, että tietyn tilan harmoniset virta komponentit ovat rikkinäisen roottorisauvojen funktio (C. Yang T.-J Kang S. B. Lee, J.-Y. Yoo, A. Bellini, L. Zarri, & F. Fiilipetti. 2015).

Tämä voidaan laskea kaavalla:

$$f_{brb,h} = (k_2(1 - s) \pm s)f_s \quad (22)$$

Missä $k_2 = 5, 7, 11, 13, \dots$

Chanseung Yang tutkimuksessa tutkittiin kahta moottoria, joissa toisessa moottorissa on viallisia roottorisauvoja, toisessa ehjät roottorisauvat ja myös toteutuu $2p = S_p$. Komponentit taajuuksilla $(5 - 4s)f_s$, $(5 - 6s)f_s$ osoitti, että näiden taajuuksien voimakkuus kasvoi antamalla kuormalla, kun viallisten roottorisauvojen lukumäärä suureni. Mikäli tilanteessa olisi seurattu vain $f_{sb} = f_s(1 \pm 2s)$ sivunauhataajuuksia, olisi virheellinen positiivinen tulos saatu mittauksista. (Yang ym. 2015)

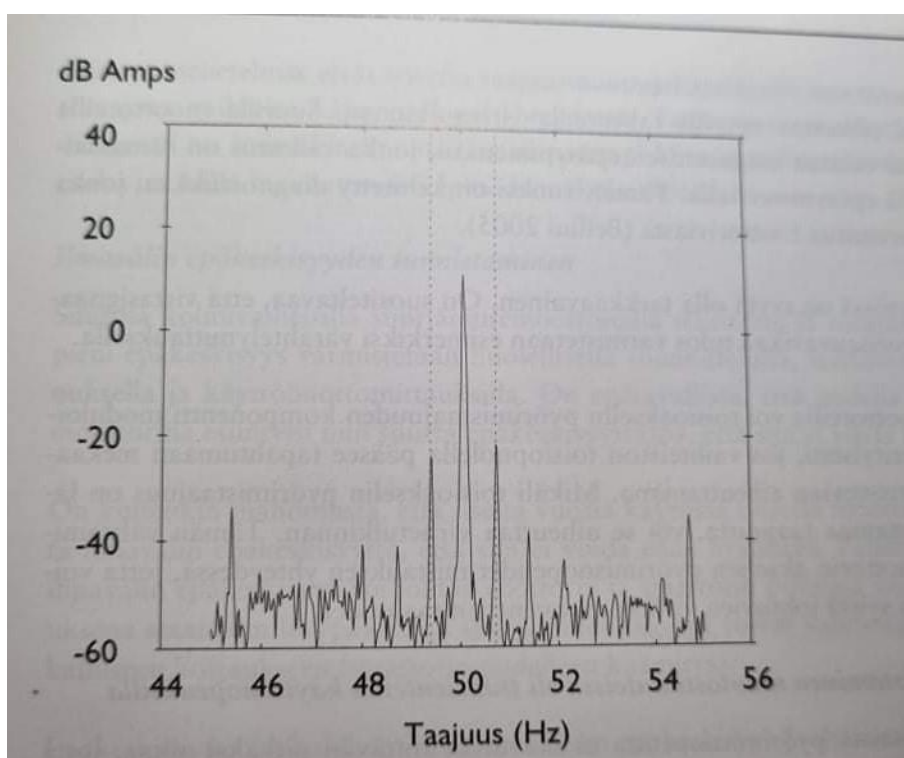


Kuva 22. Periaate $f_{brb,h}$ komponenttien induktion takana staattorin virrassa perusaaltona, viidentenä ja seitsemäntenä.

Käyttämällä Chanseung Yang menetelmää tässä työssä voidaan myös seurata korkeataajuisia komponentteja eikä pelkästään sivunauhojen taajuuksia. Minkä hyötynä voidaan varmentaa todellinen roottorisauvavaurio, mikäli korkeataajuisien komponenttien voimakkuus on kasvanut.

1.3.4 Mittaus ja huomioitavat asiat

Jotta saataisiin hyvät ja luotettavat mittaustulokset niin tietynlaisten käyttötilanteiden on oltava voimassa. Pyörimisnopeus on oltava vakio ja tunnettu, staattorin taajuus suorakäyttöisellä 50 Hz ja taajuusmuuttajakäyttöinen vakiotajuus ja perustaajuudesta erotetaan sivunauhat nostamalla kuormitusta riittävästi ja kuorman tulee olla vakio. Olisi hyvä kuormittaa moottoria n. 50 %, joka voi vaikuttaa mittaukseen niin että mittauksesta saataisiin luotettavampi. (Kokko 2019, Sähkökoneiden sähköinen kunnonvalvonta ja diagnostiikka, ym. 388–389)



Kuva 23. Staattorivirran spektri.

Kuvassa 23 on esimerkki staattorivirran spektri mittauksesta, missä vasemmanpuoleisella sivunauhalla ilmaistaan roottori vikaa ja oikeanpuoleinen nopeuden heilahtelua, mitkä saadaan laskettua kaavalla (17).

Laskemalla sivunauhan roottori ja nopeuden heilahtelun spektrin summa, josta saadaan diagnostiikkaindeksi moottoria valvoessa. Käyttämällä taulukkoa 3, voidaan verrata sivunauhan ja perustaajuuden amplitudien suhteelliselle erolle.

Käyttämällä kaavaa (18), kuvasta 23 saaduista mittaus tuloksista, missä vasemmanpuoleisen sivunauhan voimakkuus on n. -22 dB ja oikeanpuoleisen sivunauhan voimakkuus n. -20 dB ja syöttötaajuuden voimakkuus n. 16 dB. Saadaan tulokseksi 0.0897, mikä muutetaan takaisin dB-muotoon käyttämällä kaavaa (19). Jonka tulokseksi saadaan -20,94 dB, jonka jälkeen otetaan sivunauhojen keskiarvosta suhteellinen erotus syöttötaajuudesta. Lopputulokseksi saadaan sivunauhojen keskiarvon ja syöttötaajuuden eroaksi 36,94 dB. Tulosta voidaan verrata alla olevaan taulukkoon 3. Alla on esitetty kaavat järjestyksessä arvoineen:

$$a_e = \frac{\left\{ 10^{\left(\frac{-22}{20}\right)} + 10^{\left(\frac{-20}{20}\right)} \right\}}{2} = 0.0897$$

$$N_{AV} = 20 \left\{ \log_{10} \left(\frac{1}{0.0897} \right) \right\} = 20.94$$

Taulukko 3. Roottori vaurion arviointi

dB-eronarvo	Roottorin kunto
> 60 dB	Erinomainen
54–60 dB	Hyvä
48–54 dB	Seurantaan
42–48 dB	Roottorisauvavauriota syntymässä tai ylimenovastusta
36–42 dB	Kaksi sauvaa vaurioitunut tai ylimenovastusta
30–36 dB	Sauvavaurio useassa sauvassa tai päätyrenkaan vaurio
<30 dB	Useita sauvojakatkennut tai/ja päätyrenkaan vakava murtuma

Mittauksesta nähdään sivunauhat $-2sf_s$ ja $+2sf_s$ taajuuksilla, joihin kannattaa kohdentaa erityishuomiota. Kuten Kokko tutkimuksessaan toteaa, näiden sivunauhojen muodostumiseen vaikuttaa moottorin pulssimainen kuormitus, mikä tuottaa sivunauhataajuuden staattorin virtaan ainoastaan, jos kuormituksen taajuus on samalla alueella kuin $2sf_s$. (Kokko 2019, Sähkökoneiden sähköinen kunnonvalvonta ja diagnostiikka, ym. 388–389)

Jos kyseessä on vaihteistoilla varusteltu moottori pitää olla tarkkana siinä, ettei moottorin toisioakselin pyörimistaajuuden rakenneosan vaihteistovian aiheuttamaa liikettä tapahdu. Jotta kyseinen virhemittaus vältetään, on hyvä tietää akselien pyörimisnopeudet, jotta saataisiin tunnistettua virtakomponenttien taajuu-
det. (Kokko 2019, Sähkökoneiden sähköinen kunnonvalvonta ja diagnostiikka, ym. 390)

Mitattavaa kohdetta voidaan mitata erillisellä virtapihdillä kohteen syöttökaape-
lista tai virtamuuntajan toisiopiiristä. Kuvassa 24 tehty mittaus virtamuuntajan toi-
siopiiristä.



Kuva 24. Mittaus virtamuuntajan toisiopiiristä Pietarsaaren paperi-
tehtaalla

1.4 Liitinjännitekäyttönottomittaus taajuusmuuttaja käyttöisessä moottorissa

PWM-taajuusmuuttajakäyttö aiheuttaa heijastumisista moottorin liitinnavoissa sekä summautumisesta tulevan jännitepulssin yläpuolelle ja sen seuraamista vahingoista moottorin käämitykseen. Oikosulkumoottorin liitinjännitteenmittauksilla voidaan seurata pulssien voimakkuuksia ja sen nopeutta, mikäli se aiheuttaa vahinkoa moottorin käämien eristyksiin.

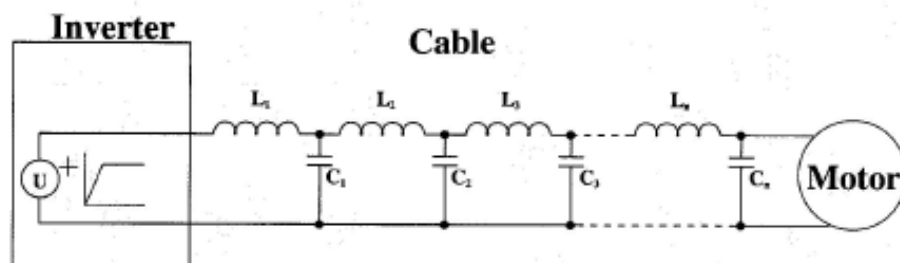
1.4.1 Ylijännite taajuusmuuttajakäytössä ja jännitepulssin heijastuminen

Inverttereistä muodostuvia pulsseja mikä aiheuttaa ylijännitettä moottorille, joita käsitellään kulkuaaltoina. Nämä edellä mainitut voivat aiheuttaa vahinkoja käämien eristyksiin. Jännitepulssin kulkuaika ja heijastuminen pitää huomioida, jännitepulssia käsiteltäessä. Korkeita pulsseja tyypillisesti esiintyy 500 V:n käyttöjännitteillä. (Jokinen K.)

Jännitepulssin heijastumisen nopeus riippuu eristeaineesta ja yleisesti käytetään kaapeleissa PVC-eristeisiä. Missä pulssin nopeus $1,7 \times 10^8$ m/s, jonka avulla invertterin jännitteen nousuaika asetellaan IGBT-komponenteille 100 nanosekuntia eli kulkuaaltotarkastelu on kohdillaan. (Jokinen K.)

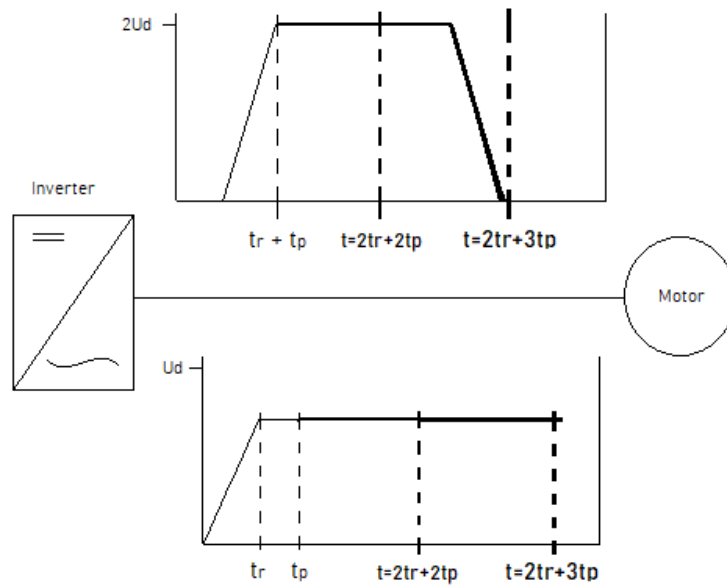
Jos halutaan yksinkertaisemmin tarkastella heijastumista, voidaan kytkennästä tehdä yksivaiheinsijaiskytkentä. Voidaan kuvitella, että invertterissä on oikosulku, sitten voidaan määritellä moottorin heijastuskerroin $\rho_h=1$. Jos moottorin

pään jännitettä invertterin suunnasta tuleva heijastuva pulssi pääsee pienentämään jännitettä, niin moottorin pulssi kasvaa kaksinkertaiseksi. Erityisesti kaapelin pituus vaikuttaa kyseiseen ongelmaan. (Jokinen K.)



Kuva 25. Yksivaiheissijaiskytkentä

Voidaan sanoa, että pulssin etenemisellä on neljä eri ajanhetkeä. Kuvassa 26 pulssin nousuaika t_r tapahtuu invertterin alkupäässä, jossa pulssi on noussut arvoon U_d . Pulssi heijastuu kaksinkertaisena $2xU_d$, syystä että moottorin impedanssi on suurempi kuin kaapelin. Jonka jälkeen jännitepulssi kulkeutuu takaisin invertteriin, koska invertterillä impedanssi on matala, jonka takia heijastuva pulssi on -1 . Heijastuva ja takaisin tuleva pulssi kumoavat toisensa, minkä takia invertterin jännite pysyy vakaana U_d välipiirin jännitteenä. Kun pulssi on saavuttanut moottorin taas, joka heijastuu negatiivisena ja kaksinkertaisella jyrkkyydellä, mistä syystä jännitepulssi on laskenut nolnaan. (Jokinen K.)



Kuva 26. Pulssin eteneminen moottorin kaapelissa.

1.4.2 Johtojen aalto-ominaisuudet ja aallon heijastuminen kuormituksessa

Jos johdon mitat tiedetään, niin voidaan laskea aallon etenemisnopeus johdolle. Käyttämällä alla olevia kaavoja voidaan laskea moottorin kaapelille nopeus ja aaltoimpedanssi (Verkkonen V. 2018):

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (23)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\ln \frac{r_u}{r_s}}{\pi} \quad (24)$$

Parijohtimelle:

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \quad (25)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{l}{c}} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \frac{\ln \frac{a}{b}}{\pi} \quad (26)$$

Mikäli johdossa voidaan olettaa, että nopeus on vakio. Niin johdon eristyksenä on ilmaa, josta syystä voidaan olettaa $\mu \approx \mu_0$ ja $\varepsilon = \varepsilon_0$. Pitää myös huomioida $\varepsilon = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$, missä ε_r on suhteellinen dielektrisyysvakio. Johdon rakenne vaikuttaa taas aaltovastuksiin Z_c kuin myös eristeen laatu. Alla olevasta taulukosta 4 voidaan katsoa dielektrisyysvakiot ja aaltovastukset ja niiden kulkunopeudet. (Verkkonen V. 2018)

Taulukko 4. Johtimen eristysten ominaisarvot

Johdon eristys.	Dielektrisyysvakio, ε_r	Johdon rakenne	Aaltovastus, Z_c	Kulkunopeus, $v = c$ (valon nopeus)
Öljytty paperi	2 ... 4	Kolmivaihejohdin	380 Ω	C
Polyeteeni PE	2,2	Suurjännitekaapeli	30 Ω	0,55 * c
Polyvinyylikloridi PVC	4 ... 8	Koaksiaalikaapeli	50...75 Ω	0,66 * c

Kulku aika yksinkertaisesti liikkuu johdon päästä päähän tietyllä ajalla. Kulku aika saadaan laskettua, jos tiedetään johdon pituus ja aallon kulkunopeus. Voidaan alla olevan kaavan avulla laskea johtimen kulku aika (Verkkonen V. 2018):

$$T = \frac{s}{v} \quad (27)$$

Kuormituksessa kaapelin sisämenon vastus R_b missä kulkeva aalto kulkee kuormitukseen. Voidaan laskea kuormituksen jännite u_b kaavalla (Verkkonen V. 2018):

$$u_b = \frac{2R_b}{R_b + Z_c} u_1 \quad (28)$$

$$u_2 = \frac{R_b - Z_c}{R_b + Z_c} u_1 \quad (29)$$

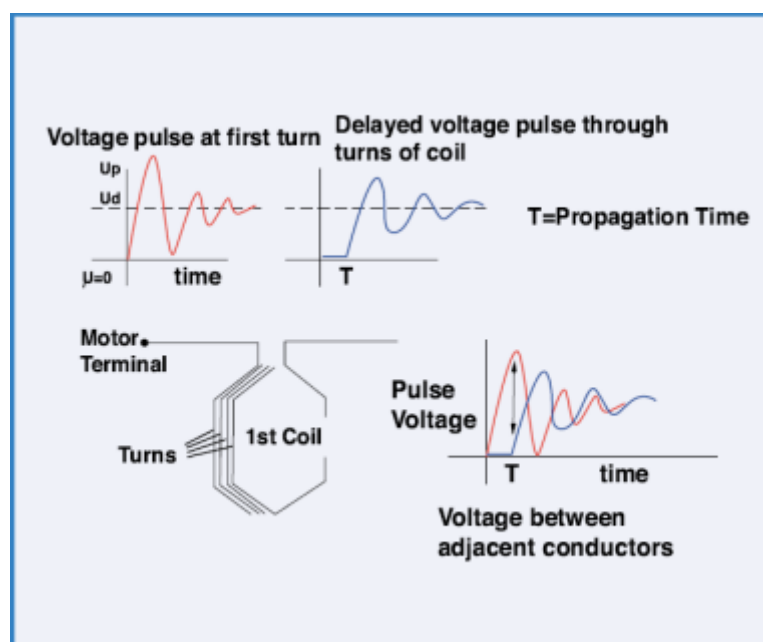
$$u_2 = \frac{R_b - Z_c}{R_b + Z_c} u_1 \quad (29)$$

Kaavoista huomataan, jos $u_2 = 0$, niin $R_b = Z_c$. Missä syöttävän johdon aaltoimpedanssi on sama kuin sisäänmenovastus eli aalto kulkee muuttumattomana laitteelle ja heijastuksia ei ilmene syöttöjohdolle. Jos taas osa aallosta heijastuu takaisin linjalle niin $R_b \neq Z_c$. Mikäli heijastumista tapahtuu linjalle, syöttävän johdon aaltoimpedanssin perusteella on sovittava syöttävä johto.

1.4.3 Ylijännitteen vaikutus ja kompensointi moottoreihin

Moottorin vaiheiden välillä tai vaiheen ja maan välillä ylijännitteellä ei ole suurta vaikutusta, mutta ylijännitteet mitkä aiheutuvat taajuusmuuttajakäytöissä on huomioitava käämin kierrosten välisessä eristyksessä. (Jokinen K.)

Moottorin käämeihin ilmenee jännitepulssi kulkuaaltona. Joka vaikuttaa kierrosten jännitteiden eroavuuteen huomattavasti, jonka takia voi aiheutua jännite-ero jännitepulssin maksimiarvosta. Kuvassa 27 esitetään, kuinka jännitepulssi kulkee moottorin käämien lävitse ja minkälainen pulssi sillä on. (GAMBICA)



Kuva 27. Moottorin käämien lävitse jännitepulssin etenemisreaktio.

Eristyksiä moottoreissa määritellään lämpöominaisuus luokalla esim. Luokka B, Luokka F tai Luokka H, mutta se ei anna kuvaa moottorin sähköisestä kestäväydestä. Enintään 690 V käyttöjännitteiselle moottorille on kaksi erilaista tapaa eristää käämitykset muotovyhtikäimitys ja vilskekäämitys. (GAMBICA)

Yleisesti pienitehoisille moottoreille tehdään vilskekäämitys ja iso tehoisille moottoreille käämitys on yleensä hyödynnetty, missä avoimet vyyhdet on kerrostettu tasaisesti. Kuvassa 28 on tyypilliset muotovytyhtikäämitys ja vilskekäämitys. (GAMBICA)



Kuva 28. Vilskekäämitys ja muotovytyhtikäämitys.

Moottoreiden eristyksiä vahvennetaan kierrossulun estämiseksi. Yleisemmin yli 690 V:n käyttöjännitteisiin taajuusmuuttajakäyttöisiin moottoreihin. (GAMBICA)

Jotta käämitys kestäisi 690 V:n käyttöjännitettä niin voidaan käyttää moottorin käämieristyksessä parannettua vilskekäämitystä. Tässä vahvistetaan urien eristettä, urien sulkeumaa, urien erotuskerrosta, vaiheiden välistä suojaa, käämityksen suojausta. (GAMBICA)

Eristyksien vahingoittumisessa on 3 erilaista mahdollisuutta:

- Käämin ja staattorin magneettisydämen eristeen hajoaminen.

Yleisesti ei ole ongelma, koska vahvennettua uraeristettä käytetään (GAMBICA)

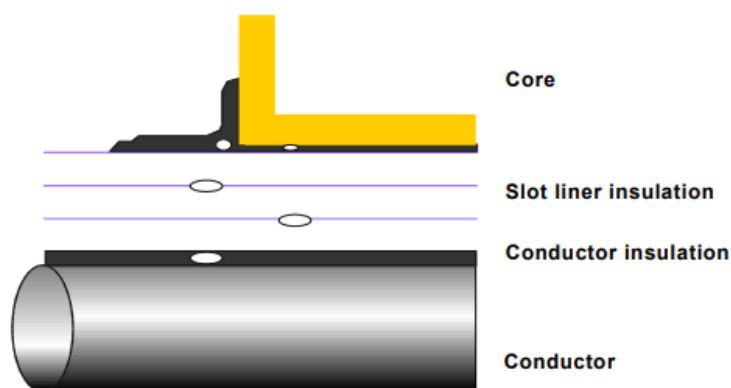
- Vaiheiden välinen vika urissa tai käämityksen suojassa.

Yleisesti ei ole ongelma, koska moottorissa on vahvennetut eristeet vaiheiden välillä tai tehty muotovyhtikäämitys. (GAMBICA)

- Kierroseristys vika vierekkäisten johtimien välissä staattorinkäämityksessä.

Missä staattorinkäämityksessä tapahtuu epätasainen jännitteen jakauma, mitkä tapahtumat liittyvät lyhyisiin nousuajan jännitepulsseihin. Muotovyhtikäämityksellä ei ole suurta ongelmaa tämän kanssa, koska kierrokset jakautuvat tasaisesti uriin. (GAMBICA)

Riippuen staattorinkäämityksen materiaalin homogeenisuudesta ja kyllästyksestä, mistä voidaan löytää hartsin kyllästyksessä tyhjiöitä. Kyseisissä tyhjiöissä vikaantumisen mekaaninen vika tapahtuu kierroseristyksessä, jota kutsutaan osittaispurkaukseksi. Kuvassa 29 kuvaillaan tyhjiöitä eristyksissä. (GAMBICA)

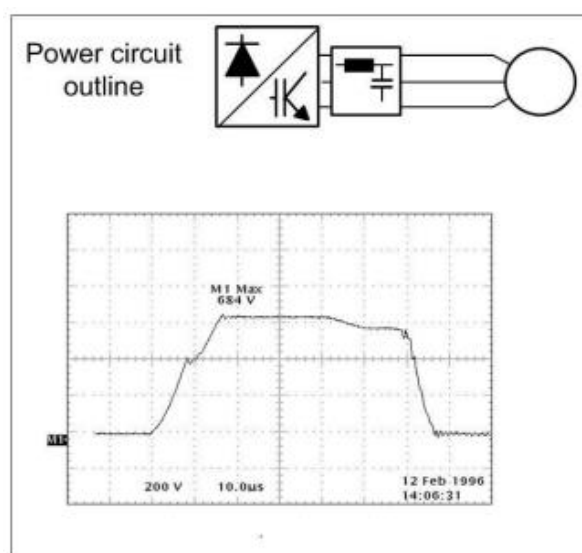


Kuva 29. Tyhjiöt eristyksissä.

Sähköinen osittaispurkaus, joka muodostuu, kun eristysjärjestelmässä läpilyöntijännite on suurempi kuin sovituspäätteen huippuarvo ja sähkökentän voimakkuus. Tämä muodostuu tyhjiössä tai ontelossa, joissa on riittävän suuri läpilyöntivoima ylittääkseen ilmavastuksen. (GAMBICA)

Mikäli eristyksessä muodostuu jatkuvia sähköisiä osittaispurkauksia niin eristys alkaa hajoamaan ajan mittaan huomattavasti. Eristyksen hajoamisprosessin eroosion vaikutukset hajottavat eristyksen materiaalia. Eristyksessä jatkuva sähköinen osittaispurkaus hajottaa eristyksen paksuutta, kunnes läpilyöntijännite on kompensoitu alle sovituspäätteen huippuarvon. Tässä vaiheessa eristyksen hajoaminen tapahtuu. (GAMBICA)

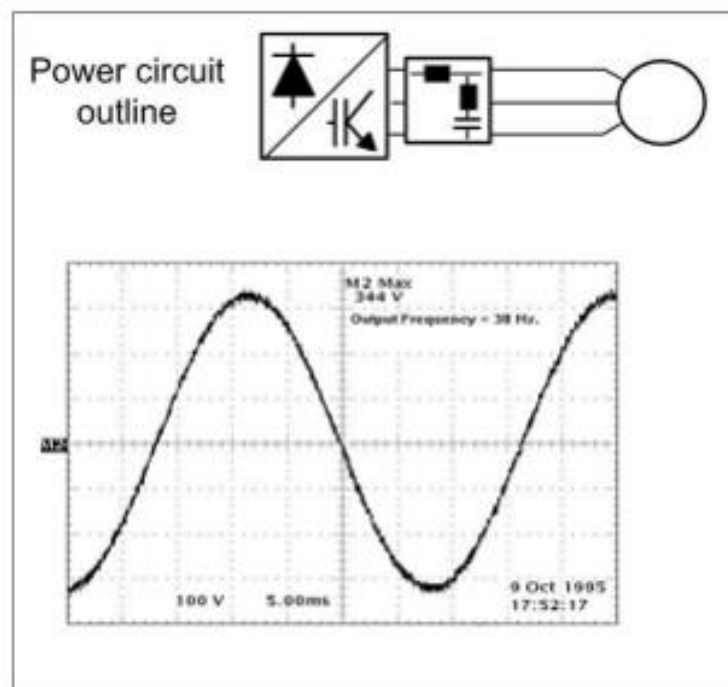
Lisäämällä taajuusmuuttajan ja moottorin väliin erilaisia komponentteja, joilla saadaan hidastettua jännitepulssin aiheuttamaa ylijännitettä moottorin navoilla. Jännitepulssin nousunopeutta voidaan hidastaa du/dt suodimella. Joten jännitepulssi ei kerkeä nousta kovin suureksi moottorin navoilla, koska moottorin jännitettä pienentää heijastuvaa negatiivista pulssia invertterissä. Mikäli moottorin käyttöjännite on 500 V niin suodinta olisi hyvä käyttää, ellei moottorin tyyppi kestä ylijännitteitä. (Jokinen K.)



Kuva 30. Jännitteen huippuarvo rajoitettu 684 V du/dt suodattimella 40 V/ μ s.

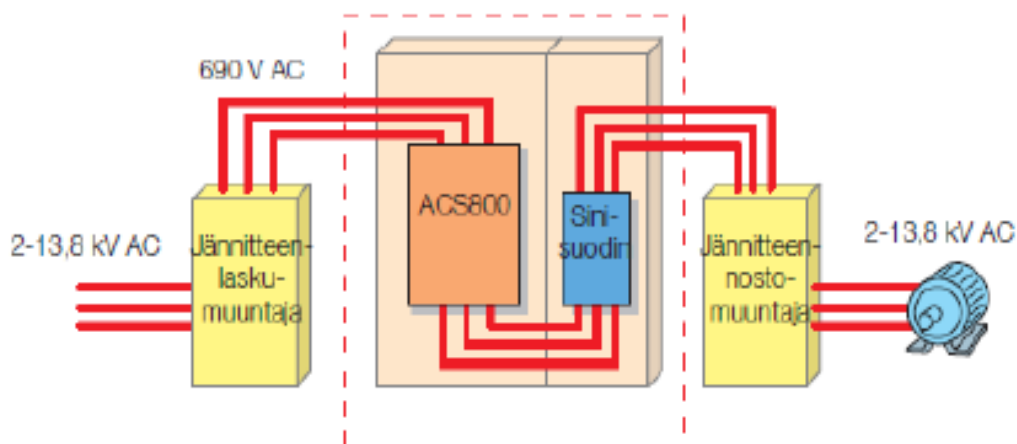
Du/dt toiminta perustuu kondensaattorien, induktiokelan ja diodeista tai vastuksista, jotka rajoittavat du/dt filteriä yleisesti n. alle 500 V/ μ s. Jonka takia se vähentää huippujännitteen nousunopeutta ja amplitudia. Edellisen sivun kuvasta 30 voidaan nähdä kyseinen ilmiö. (Jokinen K.)

Sinisuodattimella saadaan muokattua jännitettä sinimuotoisemmaksi kuten kuvassa 31. Tässä moottorin nimellistaajuudella jännitteen tehollisarvo voi jäädä alle nimellisen. Nopeissa säädöissä ja dynaamisissa sinisuotimen käyttö voi tuottaa ongelmia, mutta hyötyinä on moottorin metelin kompensointi, häviöiden kompensointi, mahdollistaa vakiomoottorien käytön pidemmällä kaapelisyötöillä, vähentää EMC häiriöitä ja laakerivirtoja, mutta ovat kalliita moottorikäyttöille. (Jokinen K.)



Kuva 31. Sinisuodin

Keskijännitemoottori käyttöillä tarvitaan sinisuodinta, koska taajuusmuuttajan ja moottorin väliin joudutaan kytkemään muuntaja. Joka käyttää pienjännitetaajuusmuuttajaa ohjaukseen. Tässä voidaan laittaa tavallinen jakelumuuntaja ennen taajuusmuuttajaa ja sinisuotimen jälkeen, kuten kuvasta 32 nähdään. (Jokinen K.)

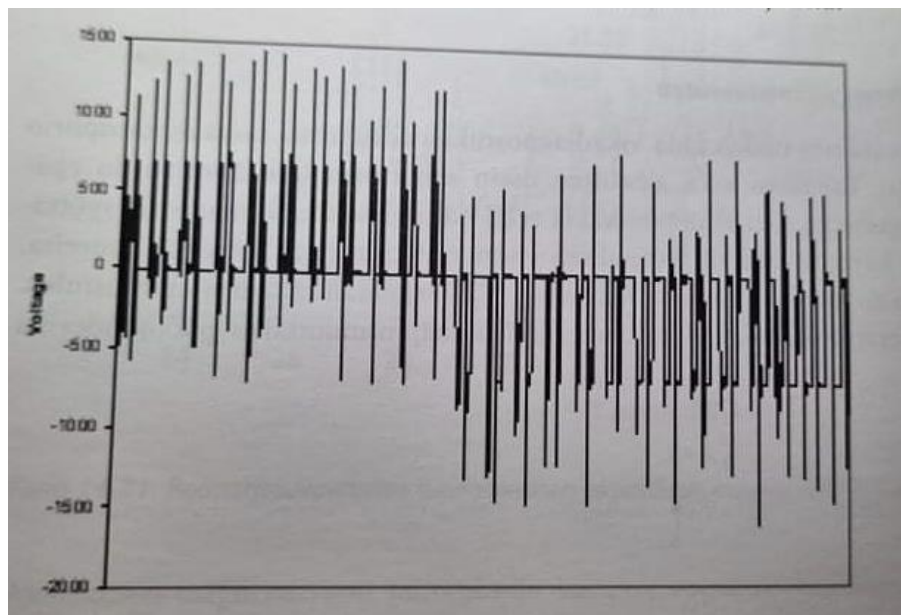


Kuva 32. Sinisuotimen käyttö jännitteenmuuntajan kanssa.

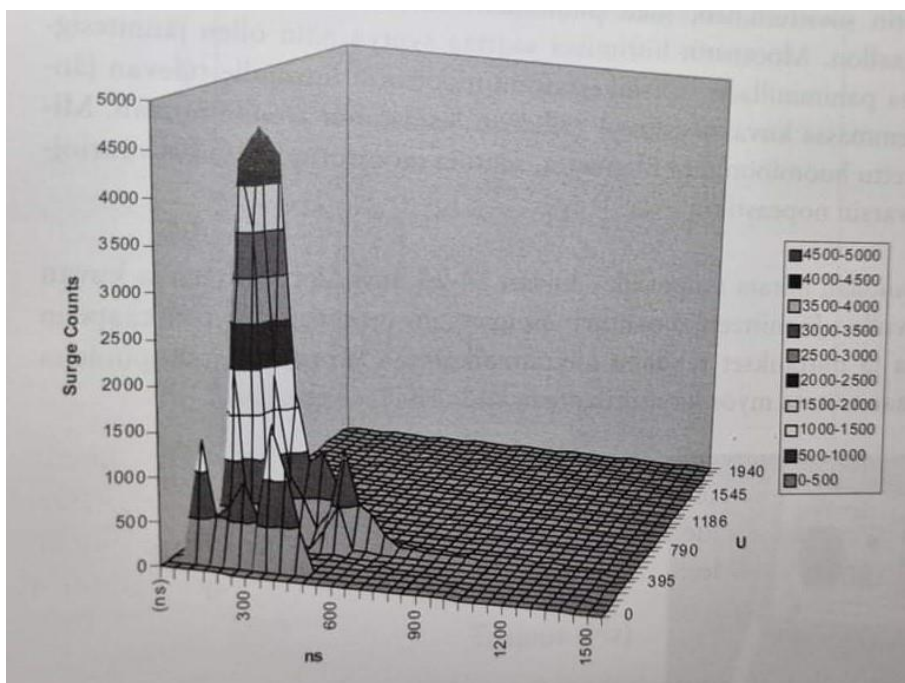
1.4.4 Liitinjännitemittaus PWM-taajuusmuuttajakäyttöisellä moottorilla

PWM-taajuusmuuttajan DC-välipiirin jännite määrää moottorin syötön liittimien pulssimaisen jännitteen suuruuden. Pulssileveysmodulaation hyötynä voidaan säätää moottorille syötettävää virtaa ja tehoa. Pulssijonon taajuutta muuttamalla voidaan säätää syötettävän signaalin taajuutta. (Kokko, V ym. 2019, 402–404)

Jännitesignaalin heijastuminen syntyy moottorien liittimissä, jossa tulevan jännitetason seurauksena voi pahimmillaan kaksinkertaistua moottorin liittimille. Tällainen tilanne saattaa tapahtua, jos ei ole otettu huomioon jännitesignaalia moottoria valitessa. Kuvasta 33 voidaan katsoa moottoriliitin mittauksen signaali, missä heijastunut jännite signaali kulkeutuu moottorille. (Kokko, V ym. 2019, 402–404)



Kuva 33. Ylijännitepiikkejä esiintyy jännitteessä heijastumisen takia



Kuva 34. Mittaustulos liitinjännitemittauksesta.

Pulssin nousunopeus kasvaa mitä suurempi pulssin jännite on, jossa nousunopeus on hyvin tärkeä lukema mittauksissa. Edellisen sivun kuvasta 34 voidaan katsoa, että pulssin amplitudi käy n. 800 V:ssa ja pulssien lukumäärä n. 4500 kpl. Mikä on aika-alueen välillä 0-< 200 ns. Kyseisissä mittauksissa on ollut käytös 690 V nimel-
lisjännitteinen moottori, johon nämä pulssinopeudet eivät ole korkeita aiheut-
taakseen liittimille suuria jännitepiikkejä. (Kokko, V ym. 2019, 402–404)

2 MITTALAITTEET

Mittauksissa on käytetty kahta eri mittalaitetta, jotka ovat Fluke MDA-550 ja AMS CSI 2130. Työssä käydään läpi mittalaitteiden toiminta, kytkennät ja ominaisuudet. Lisäksi tarkastellaan voiko kyseisillä mittalaitteilla saada myös muuta dataa.

2.1 Fluke Motor drive analyzer 550

MDA-550 analyysilaitteella voidaan tehdä monimutkaisten mittauksien määrittämisestä ja taajuusmuuttajien vianhausta helpompaa. Tällä voidaan valita haluttava mittaus tapa ja yksinkertaisesti laite opastaa miten jännite- ja virtakytkennät ovat kytkettävissä. (Fluke Corporation 2022. Kannettavat oskilloskoopit.) Tämän laitteen toimintoja mitä tullaan käyttämään tässä työssä, on moottorin akselijännite- ja jännitemodulaatiomittaus.

2.1.1 Moottorin akselijännite-, jännitemodulaatiomittaus

Moottorin akseliin voi aiheutua jännite, joka voi kulkeutua taajuusmuuttajalta jännitepulsseina moottorin staattoriin. Mikäli voiteluaineen eristyskapasiteetin läpi pääsevä jännite ylittää sen, joka voi aiheuttaa kipinätyöstöä. Tästä syystä laakerin kehä syöpyy ja muodostaa kovertumia. (Fluke Corporation 2022. Kannettavat oskilloskoopit.)

Tämä voidaan mitata hiilikuituharjammittauskärjellä, jolla voidaan havaita ylilyöntijännitteet ja pulssin amplitudin. Näistä mittauksista luodaan tapahtumalukema, jonka perusteella voidaan havaita vian syntyminen ajoissa ja voidaan aloittaa laakerien ennako huoltotoimenpiteet. (Fluke Corporation 2022. Kannettavat oskilloskoopit.)



Kuva 35. Akselijännitemittaus

Pulssien korkeat jännitehuiput PWM-taajuusmuuttajissa voidaan havaita pulssinleveysmoduloitujen signaalien mittauksien avulla, jossa suuret jännitehuiput voivat vaurioittaa moottorin eristystä. Jännitemodulaatio mitataan ilmoitetaan dU/dt suureena, joko pulssien nousuajasta tai jyrkkyydestä. Myös kytkentätaajuuden mittaamisella minkä avulla voidaan havaita vikoja sähkökytkennöissä tai maadoituksissa. Täytyy myös huomioida, että signaali kelluu. (Fluke Corporation 2022. Kannettavat oskilloskoopit.)



Kuva 36. Fluke MDA-550

2.2 AMS CSI 2130

Mittalaitteella voidaan mitata värinää, nopeutta, virtaa, magneettivuo ja lämpötilaa. Kyseinen mittalaite hankkii ja tallentaa datan automaattisesti, jonka avulla voidaan nopeasti ja tarkasti tunnistaa alkavia vikoja. Mittauksien avulla voidaan ennakkohoitaa mitattava kohde, oli sitten kyseessä mekaanista tai sähköistä vikaa.

2.2.1 Moottorin virtaspektri ja magneettivuo mittauksien asetukset

Kyseinen laite käyttää MCSA-tekniikkaa, minkä avulla voidaan mitata moottorin vaihevirta virtapihtimittarilla tai Emersonin patentoidulla vuokelalla. Tämän avulla saadaan mitattua roottorin ja staattorin kunto induktiomootoreista.

Mittalaitteelle määritellään haluttu mitattavan yksikön arvo esim. RMS-, Peak, Peak to Peak, keskiarvo tai dB-muodossa. Voidaan myös määritellä Y-akselin ja/tai X-akselin skaalaus, että esitetäänkö mitattava arvo lineaarisesti tai logaritmisesti.

Mittalaitteella analyysimittauksissa voidaan määritellä mittalaitteessa haluttu analyysitila esim. spektritulassa, jossa se muuntaa signaalin ajan aaltomuodon taajuusspektriiksi matemaattisesti FFT-muunnoksen avulla. Voidaan myös määritellä taajuusalue, spektri viivojen lukumäärä mitkä määrittelevät mittauksen tarkkuuden eli resoluution. Mittalaitteella on myös tärkeää määritellä anturin asetukset, missä asetellaan mitattava arvo esim. virta, nopeus, siirtymä, vuo matalataajuus, vuo korkeataajuus tai lämpötila. Tämän jälkeen voidaan asetella anturin herkkyys V/EU, joka asetellaan virtapihtimittarin herkkyyden mukaan.

Mittalaite käyttää kahdenlaista kaavaa laskeakseen dB-arvon, missä se antaa referenssi tehon tasolla W_{ref} , ja toisen tehon suureen määrän W , joilla on sama mitattu koko. Näitä voidaan verrata toisiinsa, minkä mittalaite laskee kaavalla (CSI 2130 Machine Health Analyzer):

$$dB = 10 \log_{10} \frac{W}{W_{ref}} \quad (23)$$

Mikäli arvo mitataan RMS-voimakkuutena, kaava uudelleen kirjoitetaan käyttämällä $W = X^2$, josta saadaan (CSI 2130 Machine Health Analyzer):

$$dB = 20 \log_{10} \frac{X}{X_{ref}} \quad (24)$$

2.2.2 Mittapäät ja adapterit

Kun halutaan mitata moottorin vuota, laitetaan vuokela moottorin N-päähän kiinni, joka esitellään kuvassa 18. Vuokelassa on 3 magneettista tassua minkä avulla kela pysyy moottorin N-päässä kiinni. Vuokelassa on D25-urosliitin, joka liitetään mittalaitteen naaras päähän. Kuvassa 37 on kyseinen vuokela, jota on käytetty tässä työssä.



Kuva 37. Vuokela

Virran mittauksessa käytetään CSI Dual Volts-adapteria, missä on 25D-urosliitin sisään tulona ja missä on kaksi BNC liitintä kaksikanavaiselle jännitteen tulolle. Tämä muuntaa mitatun signaalin jännitemuotoon. Kyseisellä adapterilla ei ole omaa virtalähdettä ja sitä käytetään vain CSI 2130 mallissa, johon on sisäänrakennettu virtalähde. (Machinery Health Management Accessories)

Virtapihtimittari kytketään A- tai B-kanavalle, mikä pitää myös määritellä mittalaitteesta käyttääkö yhtä tai molempia kanavia. Kuvassa 38 on virtapihtimittari ja CSI Dual Volts adapteri.



Kuva 38. Virtapihtimittari ja CSI Dual Volts Adapter

3 MITATTAVAT KOHTEET

Mitattavien kohteiden moottoreiden nimikilpiarvot sisältäen niiden laakerityypit, asennustavat, käämien eristysluokka sekä moottorinimellisarvot.

3.1 Sakeamassasihti

Sakemassasihdin 1 moottorinvalmistaja on ABB ja moottorityyppi on M3BP 355SMB 6 IMV5/IM1011. Moottorin nimelliskilpiarvot voidaan nähdä taulukosta 5. Taulukosta voidaan nähdä moottorin asennustavat, laakerien mallit D-päässä NU322EC/C3 sekä N-päässä 6322M/C3 ja eristyksen lämpöluokka cl F sekä onko käämityksen eristys erikoiseristetty. Kyseisellä moottorilla on käyttöjännite 690 V, mikä kytketään tähteen moottorin kytkentä kotelossa.

Taulukko 5. Sakeamassasihdin nimikilpiarvot

3~ MOTOR IE3 M3BP 355SMB 6 IMV5/IM1011						
1481030-1						
NO. 3G1F 1017S11989					Ins. cl. F	IP 55
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty
690 Y	50	200	993	213	0.82	S1
400 D	50	200	993	365	0.82	S1
415 D	50	200	993	358	0.81	S1
440 D	50	200	1193	332	0.82	S1
460 D	50	200	1194	321	0.81	S1
IE3-50HZ-95,8% (100%) -96,0% (75%) -95,6% (50%)						
SPECIAL INSULATION						
PRODUCT CODE 3GBP353220-ADL + VC						
D-END NU322EC/C3 N-END 6322M/C3						

3.2 Tyhjiöpumppu 10

Tyhjiöpumpun 10 moottorinvalmistaja on ABB ja moottorityyppi on M3BP 355SLKA 4 IM83/IM1001. Moottorin nimelliskilpiarvot voidaan nähdä taulukosta 6. Taulukosta myös voidaan nähdä moottorin asennustavat, laakerien mallit D-päässä 6322EC/C3 sekä N-päässä 6316M/C3VLO241 ja eristyksen lämpöluokka cl F sekä onko käämityksen eristys erikoiseristetty. Kyseisellä moottorilla on käyttöjännite 690 V, mikä kytketään tähteen moottorin kytkentä kotelossa.

Taulukko 6. Tyhjiöpumpun 10 nimikilpiarvot.

3~ MOTOR							M3BP 355LKA 4 IM83/IM1001						
595329-1													
NO. 3GF11093466										Ins. cl. F			IP 55
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ			Duty					
690 Y	50	500	1490	505	0.86			S1					
400 D	50	500	1490	875	0.86			S1					
415 D	50	500	1491	852	0.85			S1					
SPECIAL INSULATION													
PRODUCT CODE 3GBP352810-ADG135178405445701													
D-END 6322EC/C3 N-END 6316M/C3VLO241													

3.3 Jäähdytysvedensyöttöpumppu

Jäähdytysvedensyöttöpumppu moottorinvalmistaja on ABB ja moottorityyppi on M2BA 280SMA 4 B3. Moottorin nimelliskilpiarvot voidaan nähdä taulukosta 7. Taulukosta myös voidaan nähdä moottorin asennustavat, laakerien mallit D-päässä 6316/C3 sekä N-päässä 6316/C3 ja eristyksen lämpöluokka cl-F sekä onko käämityksen eristys erikoiseristetty. Kyseisellä moottorilla on käyttöjännite 690 V, mikä kytketään tähteen moottorin kytkentä kotelossa.

Taulukko 7. Jäähdytysveden syöttöpumpun nimikilpiarvot.

3~ MOTOR M2BA 280SMA 4 B3						
IEC 280S/M75 JK - 21865 - 1						
NO. 3GF11093466					Ins. cl. F	IP 55
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty
690 Y	50	75	1484	78	0.86	S1
400 D	50	75	1484	135	0.86	S1
SPECIAL INSULATION						
PRODUCT CODE 3GBA282210-ADA405						
D-END 6316/C3 N-END 6316M/C3						

3.4 Tyhjiöpumppu 7

Tyhjiöpumppu 7 moottorinvalmistaja on ABB ja moottorityyppi M2BA 315MLA 4 B3. Moottorin nimelliskilpiarvot voidaan nähdä taulukosta 8. Taulukosta myös voidaan nähdä moottorin laakerien mallit D-päässä 6319/C3 sekä N-päässä 6316/C3. Eristyksen lämpöluokka cl. F sekä käämityksen eristys standardi, koska ei ole erikseen mainittu nimikilpiarvoissa. Moottorin käyttöjännite on 690 V, mikä kytketään tähteen moottorin kytkentä kotelossa. Moottoria ei ohjata millään taajuusmuuttajalla.

Taulukko 8. Tyhjiöpumpun 7 nimikilpiarvot.

3~ MOTOR M2BA 315MLA 4 B3						
IEC 315M/L 90						
B3-1001-64					Ins. cl. F	IP 55
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty
690 Y	50	200	1486	202	0.88	S1
400 D	50	200	1486	350	0.86	S1
660 D	50	200	1485	211	0.87	S1
PRODUCT CODE 3GBA312410-ADA						
D-END 6319/C3 N-END 6316/C3						

4 MITTAUSTULOKSET JA ANALYYSI

Työssä tehtiin akselijännitemittauksia, jännitemodulaatio mittauksia sekä staattorivirran spektrin ja magneettivuo mittauksia. Seuraavassa käydään läpi minkälaisilla asetuksilla staattorivirran ja magneettivuon mittaukset on tehty ja selvitetään mittaustulosten tulkintaa. Tulkinnoista nähdään ylittääkö mitattu viitearvo roottorin vaurion tai laakerivaurion viitearvot. Samalla käydään läpi analysointiin liittyvät matemaattiset laskut.

4.1 Akselijännitemittaukset

Tässä tehty akselijännitemittaukset TP10 ja TP7 pumpuille, missä tyhjiöpumppu 7 on suorakäyttöinen ja tyhjiöpumppu 10 invertteriohjattu. Kuvasta 42 nähdään, kuinka mittapää on aseteltu akselille magneetti pidikkeen avulla. Mittaustuloksissa Y-akseli yhden ruudukon arvo näkyy kuvien vasemmassa alareunassa, joka viittaa jännitteen arvoon ja X-akselin yhden ruudukon arvo näkyy oikeassa alareunassa, joka viittaa aikaan. Esim. Kuvassa 39 Y-akselin yhden ruudukon arvo on 5 V sekä X-akselin yhden ruudukon arvo on 5 sekuntia.

4.1.1 Päätelmät ja analyysi

Verratessaan Kuvaa 41 ja 42 voidaan katsoa miten mittajohtimen maadoitus vaikuttaa mittalaitteeseen. Ilman maadoitusta mittalaite antaa jännite lukemaksi 0,25 Volttia ja maadoituksen kanssa 0,11 Volttia. Akselijännitteen mittauksessa maadoitetaan mittapää, joka toimii referenssimaana. Jotta saadaan tietää jännitteen pisteen maan suhteen.

Kuvan 40 ja 39 mittaustuloksia verratessa suorakäyttöiseen ja PWM-invertteriohjattuun moottoriin, josta voidaan huomata, että invertteriohjatulla moottorille indusoiuu korkeampi akselijännite kuin suorakäyttöisellä moottorilla.

Tuloksia verratessa PSK 7708 antamaan taulukkoon 9 ja 10, jossa taulukko 10 viittaa suorakäyttöisen moottorille ja taulukko 9 PWM-taajuusmuuttajien aiheuttaman jännitepulssien haitallisuus luokat.

Suorakäyttöisen moottorin mittaustuloksista on saatu n. 0,37 V. Tämä ei aiheuta huolta, koska kyseisillä laakereilla on automatisoitu voitelu ja sen avulla saadaan estettyä kipinätyöstön aiheuttamaa laakerivirtaa.

Laakerit on eristetty D-päässä sekä N-päässä labyrintti eristyksellä, minkä avulla estettyä magneettisen epäsymmetrian aiheuttamaa laakerivirtaa.

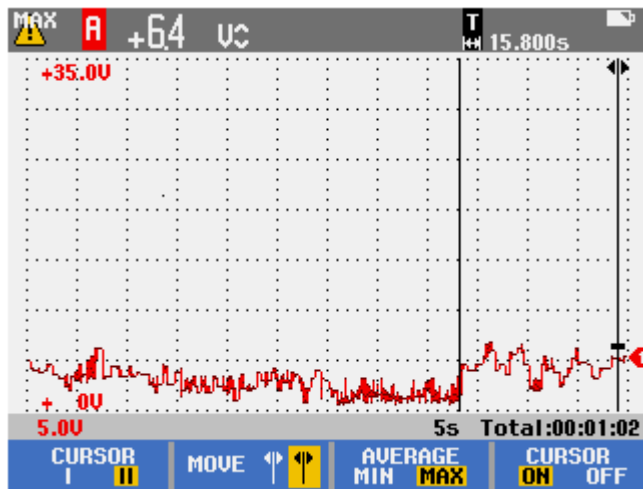
PWM taajuusmuuttaja ohjatulla moottorilla saatiin keskiarvoksi n. 6,4 V, mikä taulukossa viittaa, että voisi olla haitallinen. Moottorissa on D-päässä 6322EC/C3 ja N-päässä 6316M/C3VLO241 kulmakosketuskuulalaakerit, missä molemmat laakerit on eristetty labyrinttitiivisteellä standardina ABB:n taulukon mukaan.

Laakereiden eristeiden avulla voidaan estää indusoituvaa virtaa laakereissa, joka aiheutuu moottorin epäsymmetriasta. Laakereille on automatisoitu voitelu, jonka avulla voidaan estää kipinätyöstön aiheuttamia laakerivaurioita. Kojeistoon on asennettu myös dU/dt filtti millä saadaan hyvin estettyä du/dt virtoja sekä kipinätyöstöä. Kaapelointi ja maadoitus on tehty oikein, minkä avulla voidaan myös estää kipinätyöstön vaikutuksia sekä du/dt virtoja. Tästä voidaan päätellä, että mittaustulos ei ole haitallinen arvo.

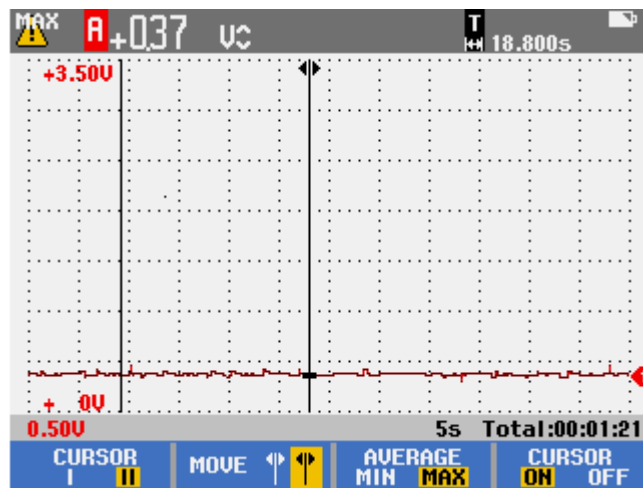
Vaihtojännitepulssien huippuarvot U_p	Haitallisuusluokitus
<3 V	Hyvä, ei haitallinen
3 ... 10 V	Epävarma, voi olla haitallinen
> 10 V	Vaarallisen korkea arvo laakerille

Taulukko 10. Suorakäyttöisen haitallisuusasteet laakereille.

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



Kuva 39. TP10 Akselijännitemittaus invertteriohjattu



Kuva 40. TP7 Akselijännitemittaus suorakäyttöinen



Kuva 41. Mittajohdin ilman maadoitusta



Kuva 42. Maadoitettu mittajohdin

4.2 Virtasignaalin- ja magneettivuomittaustulokset

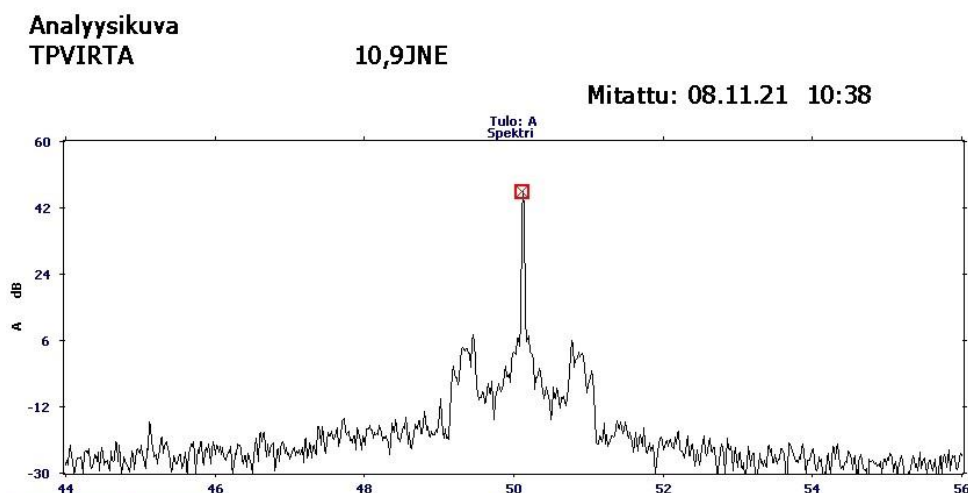
Käydään läpi mittaustuloksia kohteelta tyhjiöpumppu 10. Virtaspektri mittauksessa ohjeistuksen mukaan otetaan kaksi mittausta näytettä matalalla ja korkealla taajuusalueella. Matalalle taajuusalueeksi asetellaan 0–200 Hz ja viivojen lukumääräksi 12800 ja korkealla taajuusalueeksi asetellaan 0–2000 Hz ja viivojen lukumääräksi 12800, jotta saadaan tarkka mitta.

Magneettivuo mittauksissa asetellaan matalataajuusalueeksi 0–200 Hz sekä viivojen lukumääräksi 3200 ja korkeataajuusalueeksi 0–3000 sekä viivojen lukumääräksi 6400.

Mittaustuloksien kuvissa Y-akseli pystysuorassa viittaa dB-amplitudin voimakkuuteen virtamittauksessa sekä vuon mittauksessa. X-akseli viittaa vaakatasossa taajuusalueetta.

4.2.1 Päätelmät ja analyysi

Ensimmäisissä mittauksissa 8.11.2021 TP10:llä taajuusmuuttajalta otetut arvot pyörimisnopeus oli 1495,8 rpm, taajuus 50,11 Hz, virta 428,48 A ja teho 79,74 %.



Kuva 43. TP10 Virtaspektrin mittaustulos taajuusalueella 0–200 Hz suurimmalla kuormalla ja teholla

Mitatusta kohteesta nähdään selvät sivunauhat syöttötaajuuden sivuilla, mistä syystä on hyvä tehdä tarkempi analyysi mittauksesta.

Koska moottori ei pyöri nimellistaajuudella voidaan laskea kulmanopeus kaavan

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T} \quad (11)$$

avulla. Kaavaa muokkaamalla saadaan tulos kierrosta minuutissa.

$$\frac{50,11 \cdot 60}{2} = 1503,3$$

Tämän jälkeen voidaan laskea moottorin jättämä mikä saadaan käyttämällä kaavaa (15). Jonka arvoksi saadaan laskettua taajuusmuuttajalta otetusta pyörimisnopeudesta ja lasketun syöttötaajuuden synkroninopeuden otetuista arvoista 0,49 %.

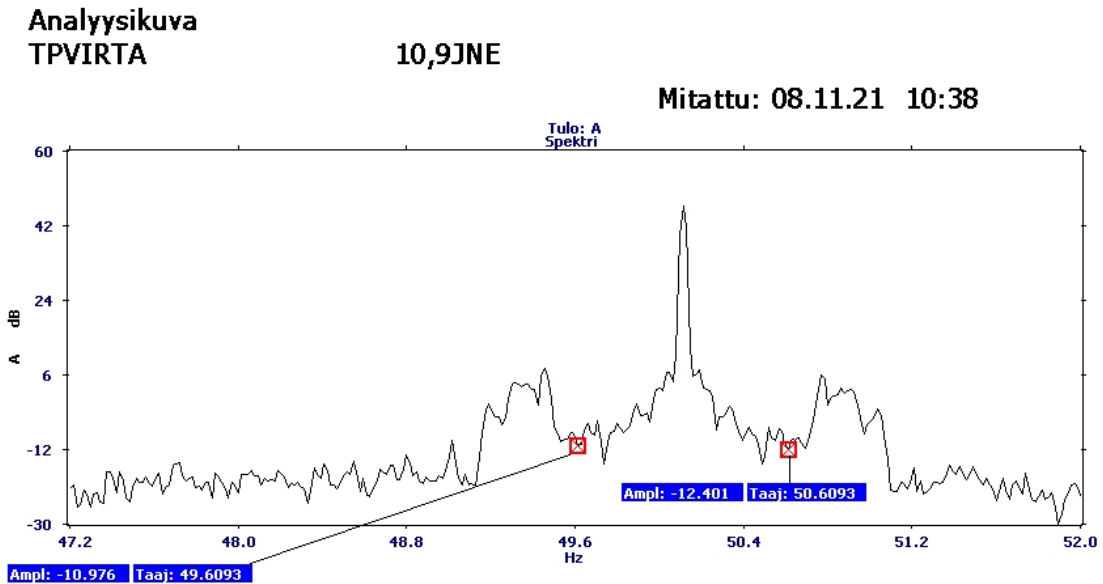
Jättämä arvoksi saadaan:

$$\frac{1503,3 - 1495,8}{1503,3} = 0,0049$$

Jättämän avulla lasketaan sivunauhataajuudet kaavalla (17), minkä arvoksi saadaan $\pm 0,499$ Hz.

$$f_{sb} = 50,11(1 \pm 2 \cdot 0,0049) = \begin{matrix} 50,60 \text{ Hz} \\ 49,61 \text{ Hz} \end{matrix}$$

Kuvasta 44 nähdään sivunauhojen taajuuksien dB-amplitudin voimakkuudet. Arvot on esitetty myös taulukossa 11.



Kuva 44. Jättämästä lasketut sivunauhataajuudet

Taulukko 11. Jättämästä lasketut sivunauhataajuudet.

$f_{sb} = f_s(1 \pm 2s)$	49,61 Hz	50,60 Hz
<i>dB Amplitudi</i>	-10,97 dB	-12,40

Sivunauhoista tämän jälkeen voidaan laskea kaavan (18) avulla absoluuttinen erotus, minkä arvoksi saadaan:

$$\frac{\left\{ 10^{\left(\frac{-10,97}{20}\right)} + 10^{\left(\frac{-12,40}{20}\right)} \right\}}{2} = 0,261$$

Joka muutetaan takaisin dB-arvoksi kaavan (19) avulla, minkä arvoksi saadaan:

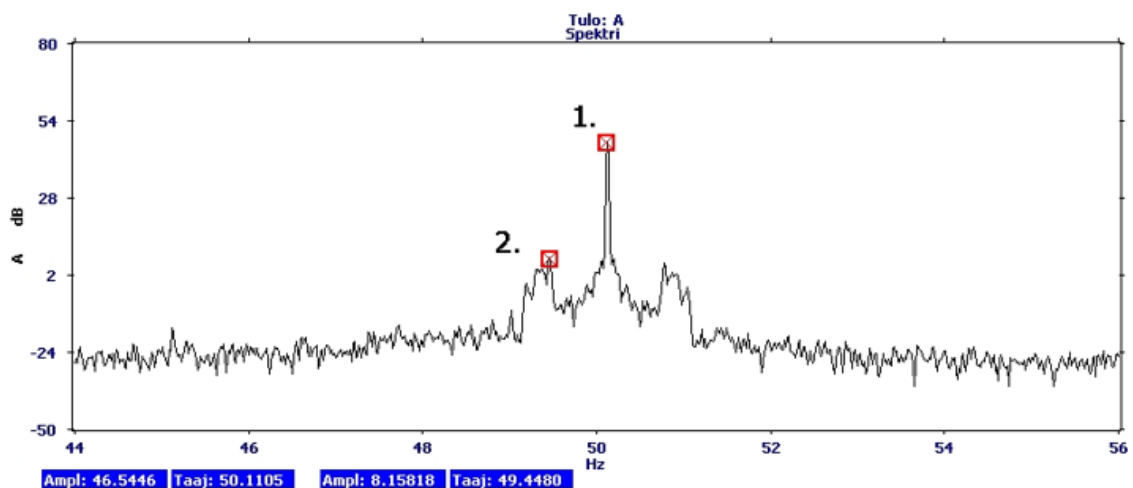
$$20 \left\{ \log_{10} \left(\frac{1}{0,261} \right) \right\} = 11,65$$

Kuvasta 43 nähdään syöttötaajuuden amplitudi mikä on 46,54 dB taajuudella 50,11 Hz. Jonka jälkeen voidaan ottaa sivunauhojen keskiarvon erotus syöttötaajuuden amplitudista. Tätä erotusta verrataan taulukkoon 3.

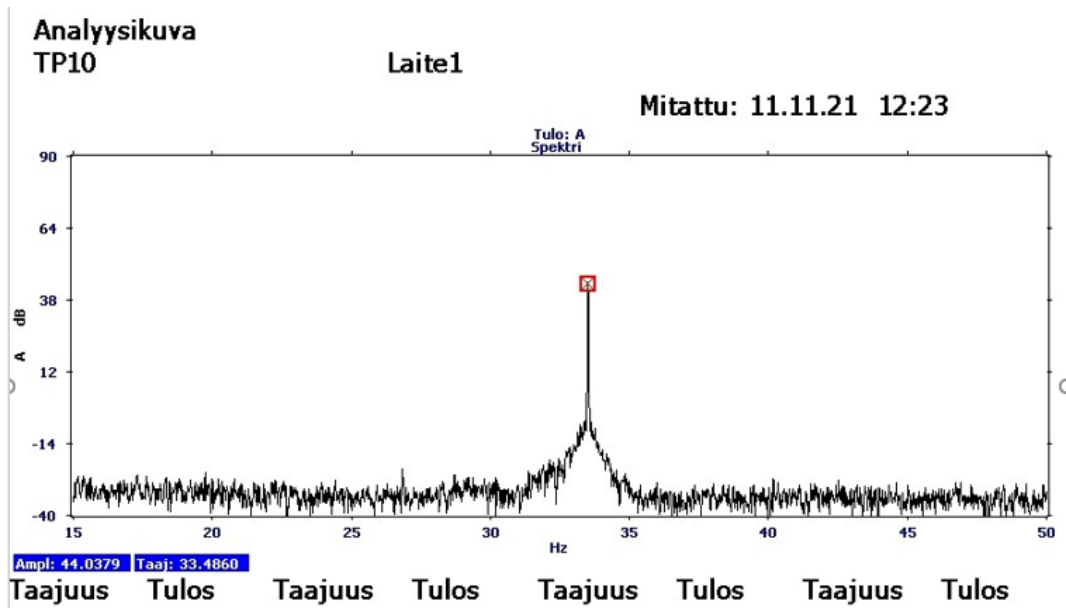
$$46,54 - (-11,65) = 58,19 \text{ dB}$$

Voidaan kumminkin huomata kuvasta 45, että korkean sivunauha taajuudella 49,448 on huomattavasti korkeampi kuin sivunauhataajuudet mitkä laskettiin jättämästä. Onko kyseinen taajuus mekaanisesta kuormasta aiheutuvaa esim. vaihteistosta, korkeataajuiset syöttövirrat tai laakerien eri vikataajuuksista.

Kuvaa 43 ja 46 verratessa toisiinsa voidaan huomata, miten kuorman vaikutus voi vaikuttaa mittaustulokseen sekä teho.



Kuva 45. Korkean sivunauhan amplitudi



Kuva 46. TP10 Virtaspektrin mittaustulos taajuusalueella 0–200 Hz pienemmällä kuormalla ja teholla

Esimerkkinä Kaavalla (22) saadaan laskettua eri taajuuskomponentit vaurioituneille roottorisauvoille:

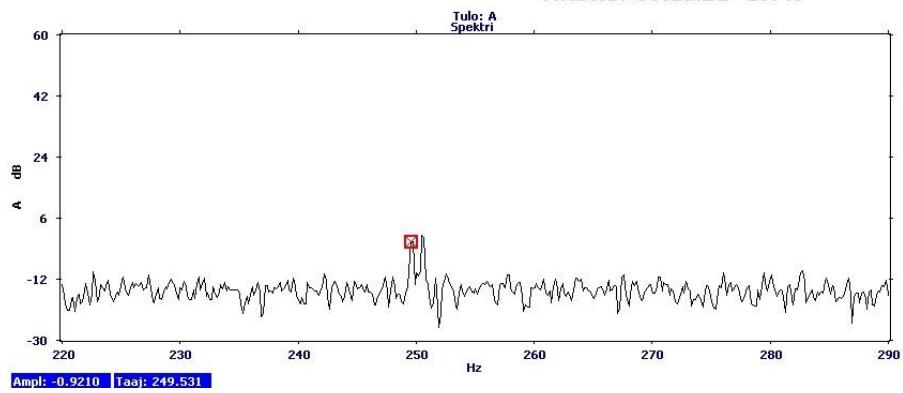
$$(k_2(1 - 0,0049) \pm 0,0049)50,11 = \begin{matrix} 249,568 \text{ Hz} \\ 249,077 \text{ Hz} \end{matrix}$$

Missä $k_2 = 5, 7, 11, 13, \dots$

Analyysikuva
TPVIRTA

10,9JNE

Mitattu: 08.11.21 10:46

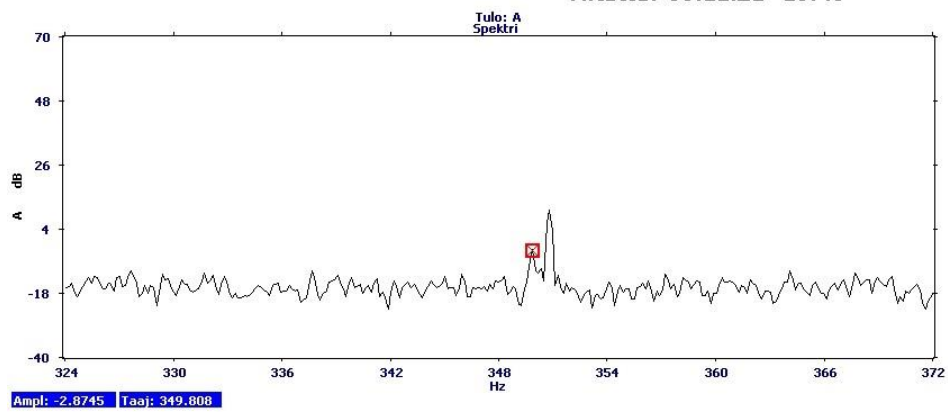


Kuva 47. $f_{brb,h}$ 5. harmonisen yliaallon mittaustulokset.

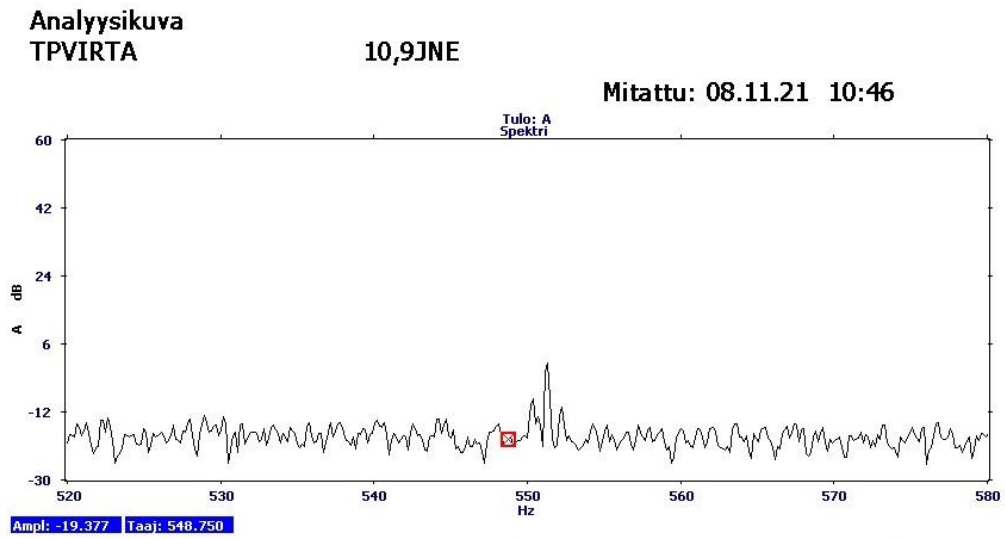
Analyysikuva
TPVIRTA

10,9JNE

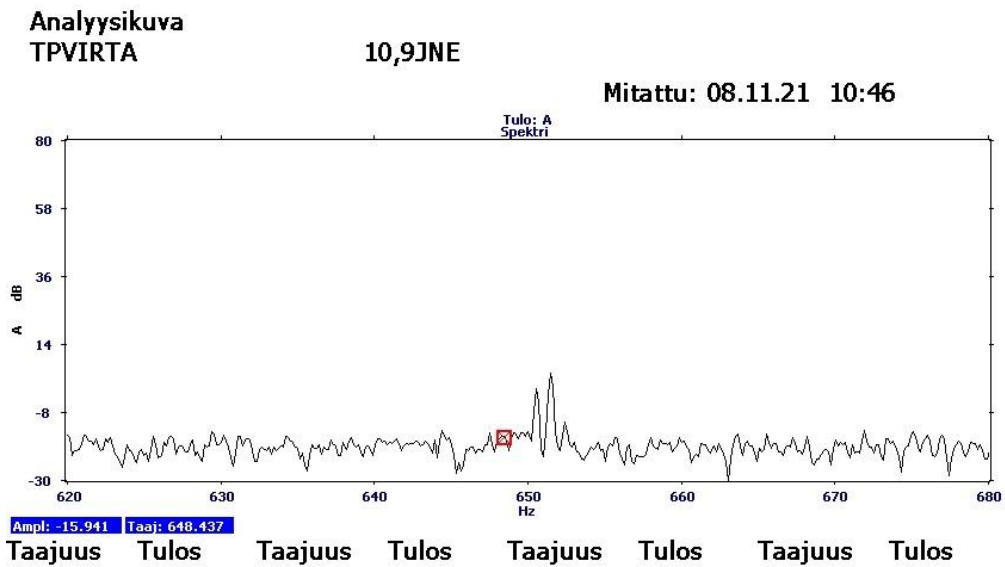
Mitattu: 08.11.21 10:46



Kuva 48. $f_{brb,h}$ 7. harmonisen yliaallon mittaustulokset



Kuva 49. $f_{brb,h}$ 11. harmonisen yliaallon mittaustulokset



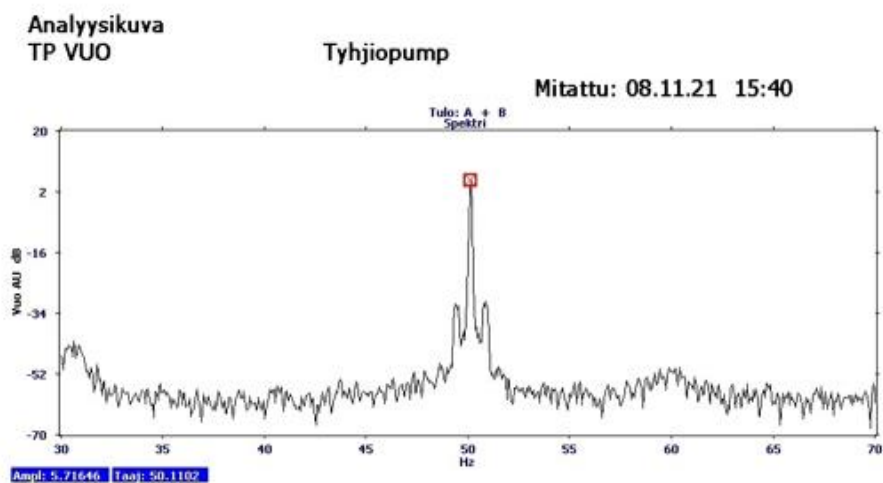
Kuva 50. $f_{brb,h}$ 13. harmonisen yliaallon mittaustulokset

Kaavalla (22) lasketut tulokset voidaan katsoa taulukosta 12. Jossa viidennen ja seitsemännen harmonisen amplitudin voimakkuus on huomattavasti voimakkaampia kuin lasketulla sivunauhojentaajuusalueella. Tulokset viittaavat alkavaan vaurioon.

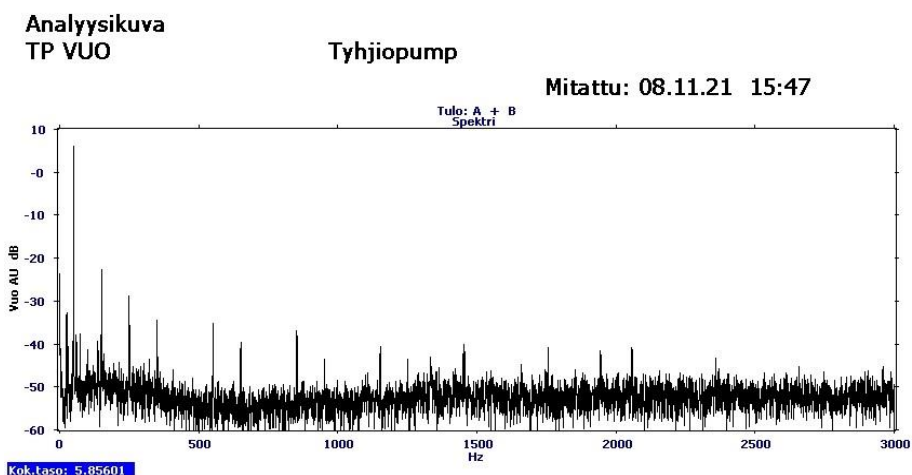
Taulukko 12. $f_{brb,h}$ harmonisten yliaaltojen mittaustulokset lasketulla taajuudella.

<i>f_{brb,h}</i> \ Kerroin	5.	7.	11.	13.
Positiivinen ero	249,568 Hz	349,270	548,710 Hz	648,430 Hz
Negatiivinen ero	249,077 Hz	348,770	548,210	647,930 Hz
dB-Voimakkuus (Mittalaitteessa oleva taajuus ja voimakkuus)	-0,92 dB (249,531 Hz)	-2,87 dB (349,808 Hz)	-19,377 dB (548,750 Hz)	-15,941 dB (648,437 Hz)

Magneettivuo mittauksista voidaan nähdä kuinka sivunauhat ovat kaventuneet huomattavasti verrattuna staattorivirran spektrin mittauksissa, josta voidaan päätellä, että kyseiset sivunauhat voi olla vaihteiston aiheuttamaa, korkeataajuisen syöttövirran tai laakerivika eritaajuusalueilta. Todennäköisesti korkeataajuisen syöttövirtojen aiheuttamaa, mutta silti selvät sivunauhat voidaan havaita magneettivuomittauksella kuvasta 51.



Kuva 51. Magneettivuon mittaustulos matalataajuus 87 % kuormalla



Kuva 52. Magneettivuon mittaustulos korkeataajuus 87 % kuormalla

Syöttötaajuuden voimakkuus 5,71 dB, jossa vasemmanpuoleisen sivunauhan voimakkuus -31,36 dB taajuudella 49,375 Hz. Joka voi viitata roottori sauvavaurioon tai päätyrenkaan vaurioon.

Tuloksien perusteella viittaisi alkavaan roottori vaurioon, mutta suosittelen mittaamaan moottoria tiheämpään tahtiin kuin normaalisti. Tärinä ja/tai virtaspektri mittauksilla.



Kuva 53. Tyhjiöpumppu 10 87 % kuormalla ja 79.74 % teholla



Kuva 54. Tyhjiöpumppu 10 60 % kuormaa ja 34.89 % teholla

4.3 Jännitemodulaatiomittaus

Työssä käydään läpi mitattujen moottorien invertterien lähtöjännitettä, mikä muodostaa nopeasti nousevia pulsseja. Jännitepulssi aiheuttaa ylijännitettä moottorille, mikä voi vahingoittaa käämien eristystä. Yleisemmin viat esiintyvät 500 V:n käyttöjännitteillä. Jännitepulssi on mitattu vaiheesta vaiheeseen ja vaiheesta maahan nähdessä turvakytkimeltä jokaiselta kohteelta. Kohteina tässä mittauksessa on Sakeamassasihti 1 ja Jäähdytysvedensyöttöpumppu.

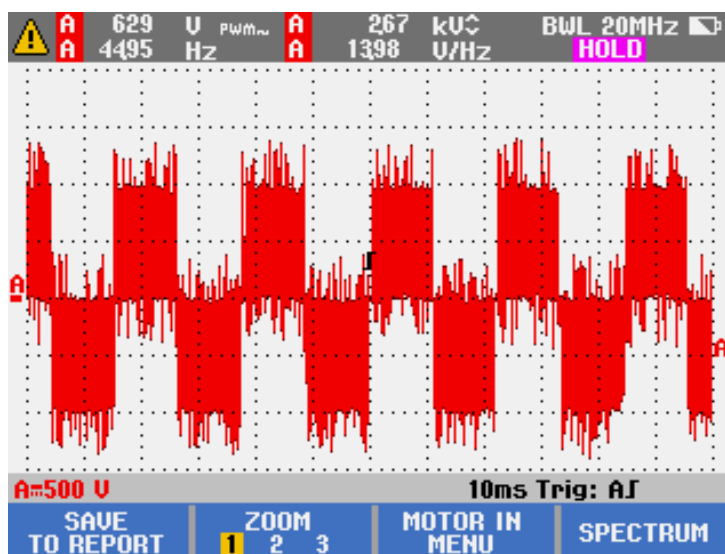
Taulukossa 13 käydään läpi mitatut arvot, jossa on kolme eri tilanne kaappausta. Tilassa 1 ensimmäinen solu viittaa jännitteen pulssinleveysmodulaatio arvoon, toinen solu huipusta huippuun, kolmas solu jännitteen huippua arvoa ja kolmas solu jännitteen minimi arvoa. Tilassa 1 kolmas solu viittaa jännitteen keskiarvoon ja neljäs solu jännitteen ja taajuuden suhdetta vaihe vaiheelta mittauksissa sekä kytkentätaajuutta vaihe maasta mitattuna. Tilassa 3 toisessa solussa esitetään pulssin nopeutta, kolmannessa solussa pulssin nousuaikaa ja neljännessä solussa ylivärahelyä. Alleviivattu teksti viittaa vaiheesta maahan mittauksien antamiin arvoihin.

Taulukko 13. Esimerkki taulukko jännitemodulaatiomittauksista.

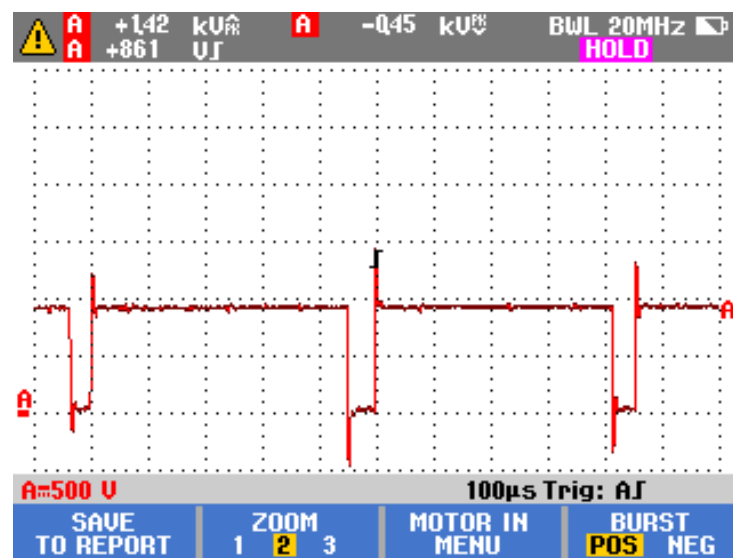
Mittaustapa					
Moottorin tulo		Sähkötunnus ja kohteen nimi			
Jännitemodulaatio		Lukema 1	Lukema 2	Lukema 3	Lukema 4
<u>Vaiheesta-vaiheeseen / Vaiheesta-maahan</u>	Tila 1	V pwm	V, pk-to-pk	Hz / <u>V_{huippu maks.}</u>	V/Hz / <u>V_{huippu min.}</u>
	Tila 2	V, huippu maks.	V, huippu min.	Delta V	<u>SW Hz</u>
	Tila 3	V, huippu maks.	Delta V/s	Nousuajan huippu	Ylivärahely %

4.3.1 Jännitemodulaatio mittaustulokset

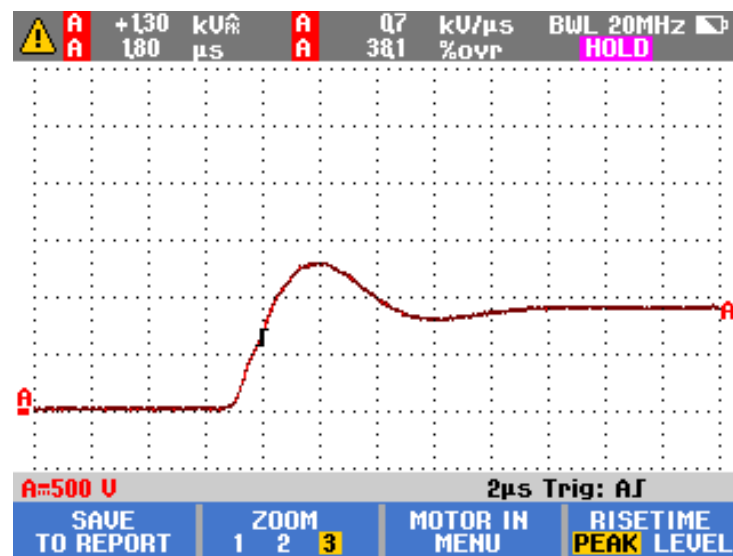
Mittaustuloksissa Y-akseli yhden ruudukon arvon näkyy kuvien vasemmassa alareunassa mikä viittaa jännitteen arvoon sekä X-akselin yhden ruudukon arvo näkyy oikeassa alareunassa mikä viittaa aikaan. Esim. kuvassa 57 Y-akselin yhden ruudukon arvo on 500 V sekä X-akselin yhden ruudukon arvo on 2 mikrosekuntia. Mittaustuloksissa tulee kiinnittää huomiota tila 3 lukemiin 1, 3 ja 4. Tilassa 3 lukema 1 voidaan nähdä jännitepulssin huippu, lukemasta 3 jännitepulssin nousuajan huippu sekä lukemasta 4 nähdään jännitteen ylivärähtely nimellisjännitteestä.



Kuva 55. Tila 1 vaiheesta vaiheeseen mittaus



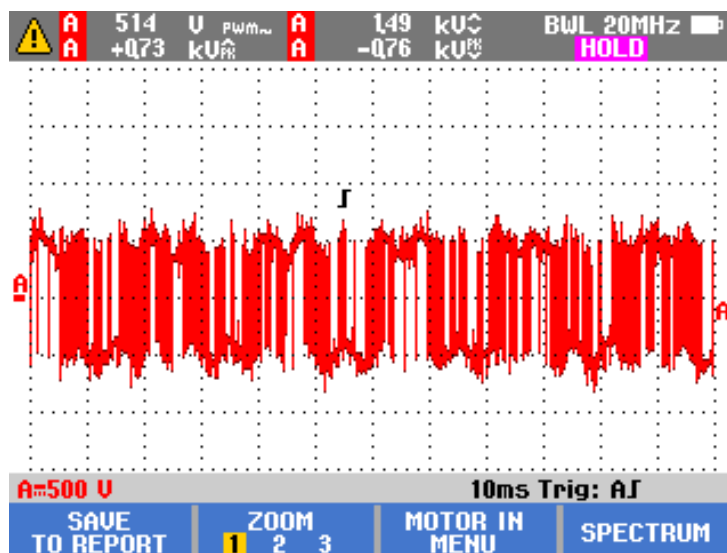
Kuva 56. Tila 2 vaiheesta vaiheeseen mittaus



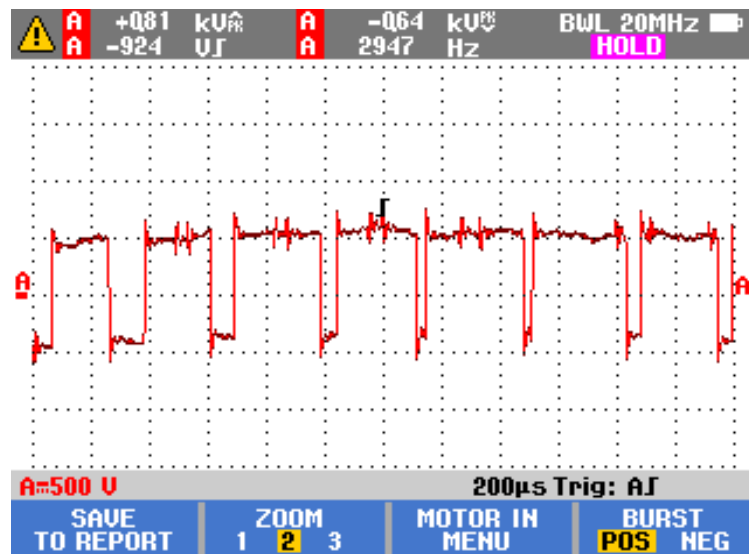
Kuva 57. Tila 3 vaiheesta vaiheeseen mittaus

Taulukko 14. Jäähdytysveden syöttöpumpun vaiheesta-vaiheeseen mittaustulokset.

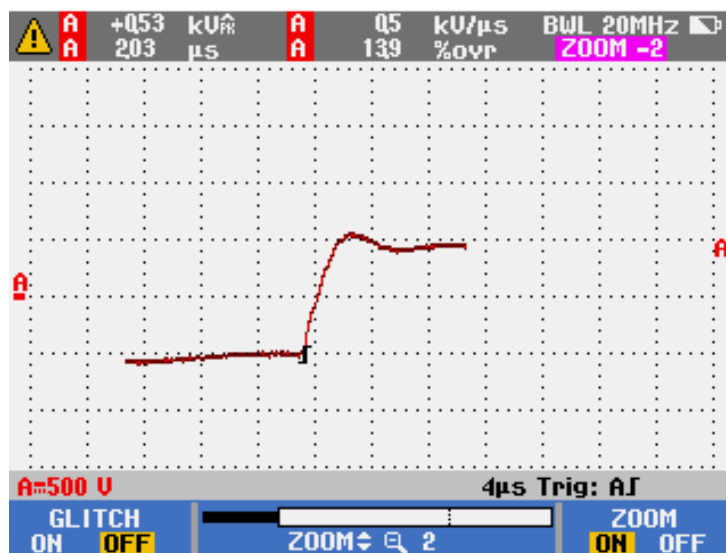
Mittaustapa					
Moottorin tulo		Jäähdytysveden syöttöpumppu 75kW			
Jännitemodu- laatio		Lukema 1	Lu- kema 2	Lu- kema 3	Lu- kema 4
Vai- heesta- Vaihee- seen	Z1	629 V pwm	2,67 kV	+44,95 Hz	13,98 V/Hz
	Z2	1,42 kVpk	-0,45 kVpk	861 dU	
	Z3 Peak	+1,30 kVpk	0,7 kV/ μ s	1,80 μ s	38,1 %



Kuva 58. Tila 1 Jäähdytysveden syöttöpumppu vaiheesta maahan mittaus.



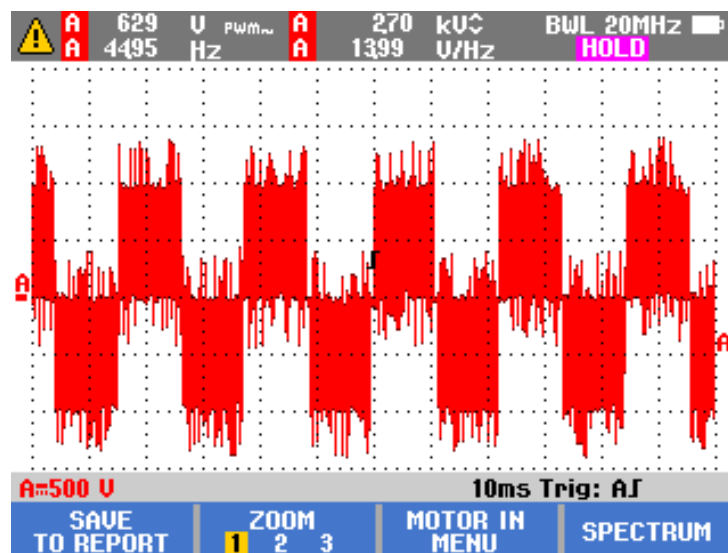
Kuva 59. Tila 2 Jäähdytysveden syöttöpumppu vaiheesta maahan mittaus



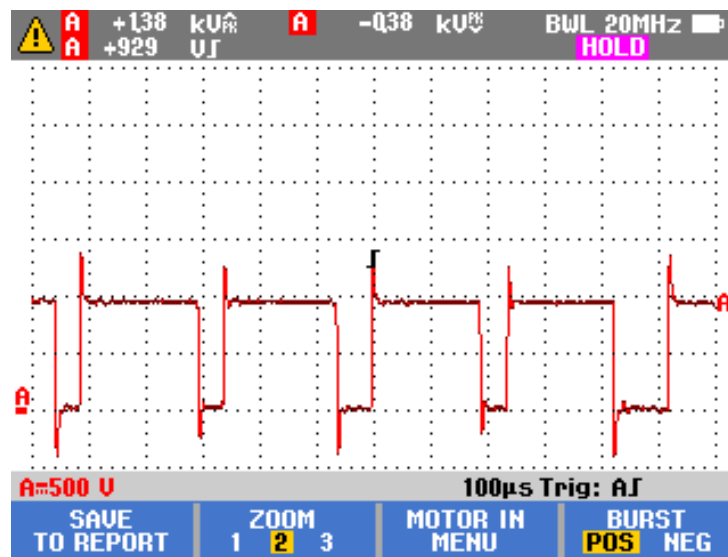
Kuva 60. Tila 3 Jäähdytysveden syöttöpumppu vaiheesta maahan mittaus

Taulukko 15. Jäähdytysveden syöttöpumpun vaiheesta-maahan mittaustulokset.

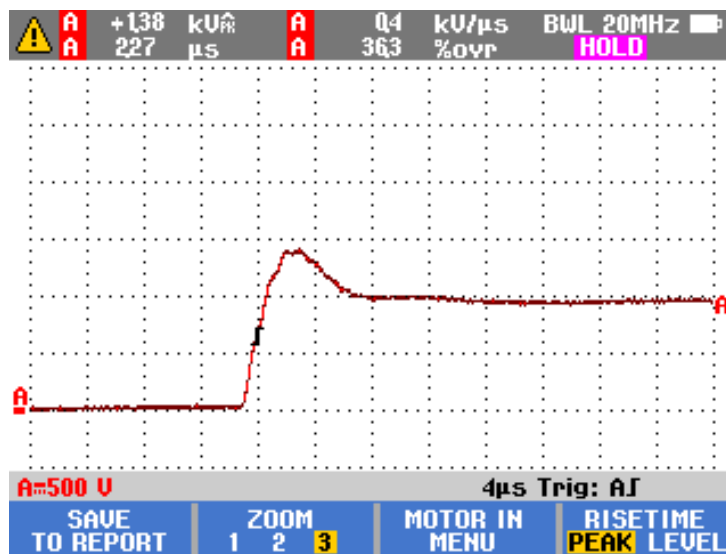
Mittaustapa					
Moottorin tulo		Jäähdytysveden syöttöpumppu 75kW			
Jännitemodulaatio		Lukema 1	Lukema 2	Lukema 3	Lukema 4
Vaiheesta-maahan	Tila 1	514 V pwm	1.49 kV	+0.73 kVpk	-0.75 kVpk
	Tila 2	0.81 kVpk	-0.64 kVpk	-924 dU	2947 Hz
	Tila 3	+0.53 kVpk	0.5 kV/ μ s	2.03 μ s	13.9 %



Kuva 61. LA15 Sakeamassasihti 1 tila 1 vaiheesta vaiheeseen mittaus



Kuva 62. LA15 Sakeamassasihti 1 tila 2 vaiheesta vaiheeseen mittaus



Kuva 63. LA15 Sakeamassasihti 1 tila 3 vaiheesta vaiheeseen mittaus

Taulukko 16. Sakeamassasihti 1 nimikilpiarvot.

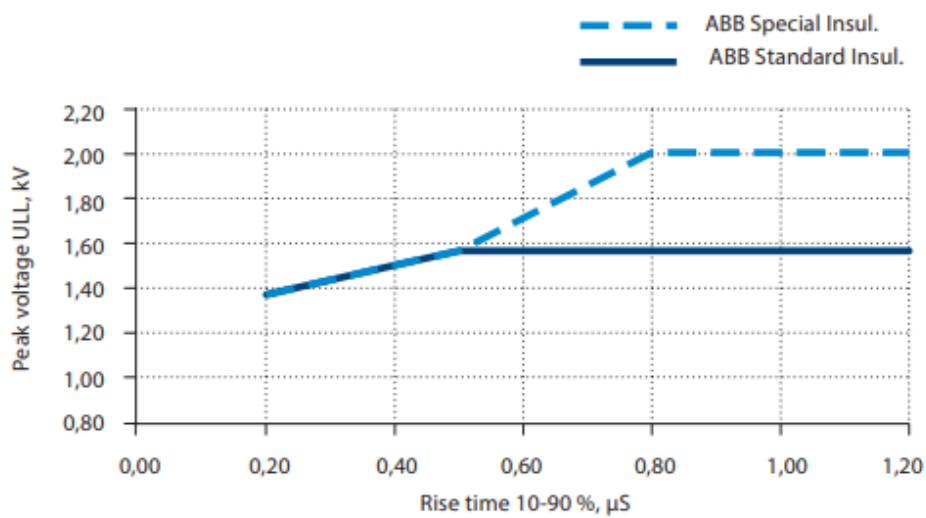
Mittaustapa					
Moottorin tulo		LA15 Sakeamassasihti 1 200 kW			
Jännitemodulaatio		Lukema 1	Lukema 2	Lukema 3	Lukema 4
Vaihe- Vaihe	Z1	629 V pwm	2.70 kV	44.95 Hz	13.99 V/Hz
	Z2	1.38 kVpk	-0.38 kVpk	+929 dU	
	Z3 Peak	+1.38 kVpk	0.4 kV/ μ s	2.27 μ s	36,3 %

4.3.2 Päätelmät ja analyysi

Näiden mittauksien avulla ei voida tulkita käämitysten eristeiden kuntoa, mutta voidaan helposti todeta kestävätkö eristeet kyseistä jännitepulssia. Molemmissa kohteissa tapahtuu ylivärähtelyä mikä oli oletettavissa, kun kyse on invertteriohjatusta moottoreista, joiden käyttöjännite on 690 V. Mittauksissa mielenkiintoista on se, että 200kW tehoisella moottorilla on melkein yhtä suuri ylivärähtely kuin 75kW tehoisella moottorilla. Todennäköisesti vaikuttavia tekijöitä on, että 75kW tehoista moottoria ohjataan DTC ohjauksella ja kytkentä taajuus asetettu 1,5kHz-4,5kHz alueelle. Kun taas 200kW tehoista moottoria ohjataan taajuusohjauksella ja kytkentätaajuus on asetettu 2kHz.

Kun mittauksia tulkitaan kestäkö käämien eristykset tulevaa jännitepulssia, joka voidaan parhaiten katsoa tilan 3 mittauksista. Tässä nähdään pulssin korkein huippu ja nousuaika. Näitä tuloksia voidaan verrata ABB:n antamiin käyrä arvoihin, mistä voidaan katsoa kuinka korkeita pulsseja eristykset kestävät.

Kuvasta 64 voidaan katsoa kuinka suuria jännitepulsseja standardi eristys tai erikoiseristys kestää. Myös mainitaan vaiheesta maahan mitattu jännitepulssin korkein pulssi sallittu normaalilla eristyksellä 1,3kV ja erikoiseristyksellä 1,8kV. Kyseisillä moottoreilla on käämitykset erikoiseristetty, minkä perusteella voidaan todeta, että moottorit kestävät kyseiset jännitepulssit.



Kuva 64. ABB Maksimi sallittu vaiheesta vaiheeseen jännitepulssit

LÄHTEET

A. Muetze, A. Binder, H. Vogel, & J. Hering, "Experimental evaluation of endangerment of ball bearings due to inverter-induced bearing currents," Conference Record of the 2004 IEEE Industry

AC Motor bearing failure due to electrical discharge, TAPPI 2006. Kressbach, A. Viitattu 18.11.2021. https://www.tappi.org/content/Events/19TISSUE/NTS1.1_Kressbach.B.pdf

The GAMBICA Association Ltd 2016. Motor shaft voltages and bearing currents under PWM inverter operation. Westminster Tower, 3 Albert Embankment, London SE1 7SL. Viitattu 20.11.2021. <https://www.gambica.org.uk/static/uploaded/2a9db9d4-9840-46a4-a37e2c071df8f1b3.pdf>

Gerd M. Bearing currents in inverter-fed AC-motors. 2006. SIEMENS. Germany, Erlangen.

CSi (1997) Motor View Software Manual. Computational Systems Incorporated.

G. B. Kliman, R. A. Koegl, J. Stein, R. D. Endicott M. & W. Madden, "Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 3, no. 4, pp 873-879, Dec. 1988.

Verkkonen V. Epätahtikoneet. Opintomoniste Vaasan ammattikorkeakoulu 2017.

Jokinen K. Moottorikäyttöjen säätö. Opintomoniste Vaasan ammattikorkeakoulu.

Verkkonen V. Taajuusanalyysi. Opintomoniste Vaasan ammattikorkeakoulu 2018.

2019 Kuntoon perustuva kunnossapito käsikirja Mikkonen H., Miettinen J., Leinonen P., Jantunen E., Kokko V, Riutta E., Sulo P., Komonen K., Lumme V-E., Kautto J., Heinonen K., Lakka S. & Mäkeläinen R.

Miettinen, J & Jantunen, E. 2019. Mittaussuureet ja signaalinkäsittelymenetelmät. Teoksessa Kuntoon perustuva kunnossapito käsikirja, 190, 191, 194–195. Toim. Mikkonen H. Savion Kirjapaino Oy. Kerava. Kustantaja KP-Media Oy.

Thomson, W. & Culbert, I. “Motor Current Signature Analysis (MCSA) To Detect Cage Winding Defects” by The IEEE 2017. Kappale 4, s. 94-95.

The GAMBICA Association Ltd 2016. Motor insulation voltage stresses under PWM inverter operation. Westminster Tower, 3 Albert Embankment, London SE1 7SL. Viitattu 5.12.2021 <https://www.gambica.org.uk/static/uploaded/e41820bb-886a-463b-829aaa07c6ec486c.pdf>

Kokko, V. 2019 Sähkökoneiden sähköinen kunnonvalvonta ja diagnostiikka. Teoksessa Kuntoon perustuva kunnossapito käsikirja, 386–396. Toim. Mikkonen H. Savion Kirjapaino Oy. Kerava. Kustantaja KP-Media Oy.

Kokko, V. 2019 Sähkökoneiden sähköinen kunnonvalvonta ja diagnostiikka. Teoksessa Kuntoon perustuva kunnossapito käsikirja, 399–400. Toim. Mikkonen H. Savion Kirjapaino Oy. Kerava. Kustantaja KP-Media Oy.

Kokko, V. 2019 Sähkökoneiden sähköinen kunnonvalvonta ja diagnostiikka. Teoksessa Kuntoon perustuva kunnossapito käsikirja, 402–404. Toim. Mikkonen H. Savion Kirjapaino Oy. Kerava. Kustantaja KP-Media Oy.

W.T. Thomson," On-Line Current Monitoring – The Influence of Mechanical Loads/Unique Rotor Designs on the Detection of Broken Rotor Bars in Squirrel Cage Induction Motors, "ICEM '92 University of Manchester Science and Technology (UMIST), UK, September 1992.

C. Yang T.-J Kang S. B. Lee, J.- Y. Yoo, A. Bellini, L. Zarri, & F. Fiilipetti, "Screening of false induction motor fault alarms produced by axial air ducts based on the space-harmonic-induced current components," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no 3, March 2015, 1803-1813.

Fluke Corporation 2022. Kannettavat oskilloskoopit. Viitattu 18.11.2021.
<https://www.fluke.com/fi-fi/tuote/sahkotestaus/kannettavat-oskilloskoopit/mda-500-series>

Emerson Process Management, CSI 2130 Machine Health Analyzer Single- and Dual-Channel. USA, Knoxville, TN 37932. Viitattu 12.12.2021
https://www.maintenance.org/fileSendAction/fcType/0/fcOid/400998571506985888/filePointer/401420994973995345/fodoid/401420994973995341/2130_ru_ref-manual.pdf

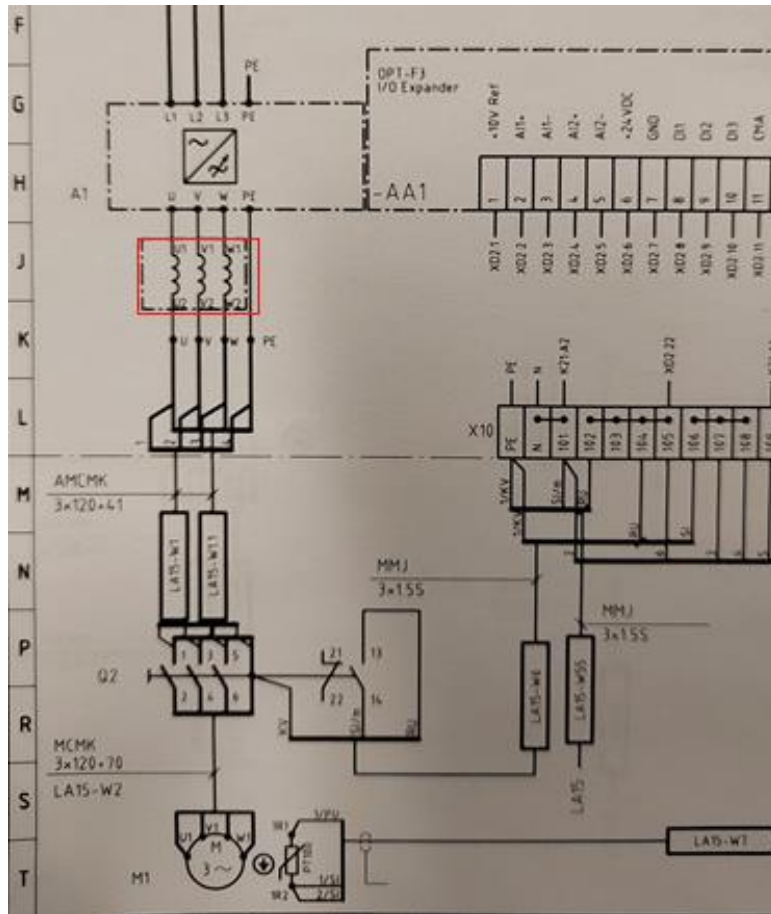
Emerson Process Management, Machinery Health Management Accessories. USA, Knoxville, TN 37932. Viitattu 16.12.2021
<https://docplayer.net/12740326-Machinery-health-management-accessories.html>

LIITTEET

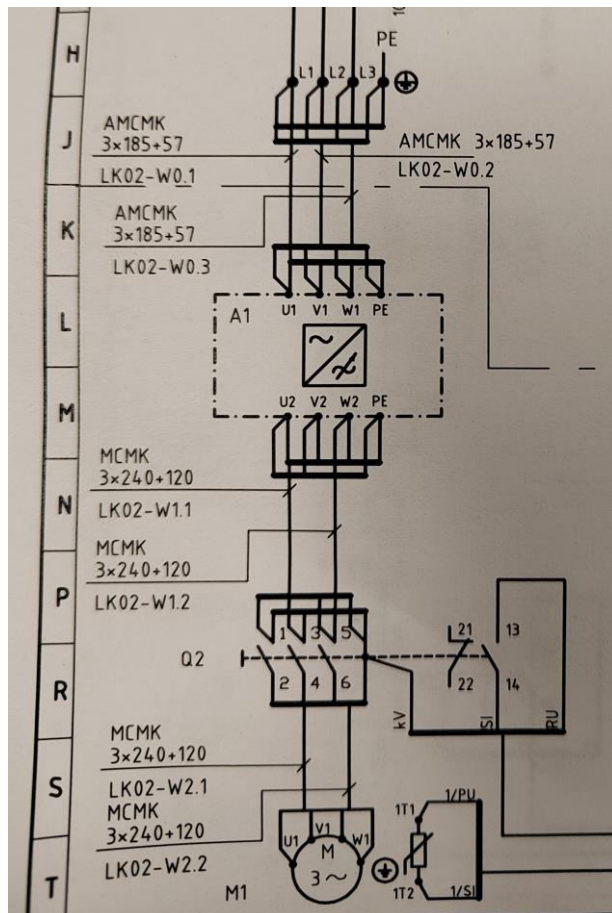
LIITE 1 Sakeamassasihdin 1 taajuusmuuttajan parametrit.

3.1.2 Moottorisäätö		
P 3.1.2.1	Ohjaustapa	Taajuusohjaus
P 3.1.2.2	Moott. Tyyppi	Induktiomoottori
P 3.1.2.3	KytKentätaajuus	2.0
2.1 Monivalvonta		
V 2.1.1	Taajuusohje	44,97
V 2.1.2	Lähtötaajuus	44,97
V 2.1.3	Moottorin virta	157
V 2.1.4	Pyör.nopeus	893
V 2.1.5	Moott.Momentti	73
V 2.1.6	Moott. Teho	65,7
V 2.1.7	Moott.jänn	620,6
V 2.1.8	Välip. Jännite	955
V 2.1.9	Laitteen lämpöt.	56

LIITE 2 Sakeamassasihdin piirikaavio.



LIITE 3 Tyhjiöpumpun 10 piirikaavio.



LIITE 4 Jäähdytysvedensyöttöpumpun moottorin arvot ja säätötapa.

99. Motor data			
3	Motor type	Asynchronous motor	NoUnit
4	Motor control mode	DTC	NoUnit
6	Motor nominal current	78,0	A
7	Motor nominal voltage	690,0	V
8	Motor nominal frequency	50,00	Hz
9	Motor nominal speed	1484	rpm
10	Motor nominal power	75,00	kW
11	Motor nominal cos φ	0,00	NoUnit
12	Motor nominal torque	0,000	Nm
13	ID run requested	None	NoUnit
14	Last ID run performed	Standstill	NoUnit
15	Motor polepairs calculated	2	NoUnit
16	Motor phase order	U V W	NoUnit
18	Sine filter inductance	1,000	mH
19	Sine filter capacitance	30,00	μ F
97. Motor control			
1	Switching frequency refere...	4,500	
2	Minimum switching freque...	1,500	

LIITE 5 Jäähdytysveden syöttöpumpun piirikaavio.

