



Taajuusmuuttajakäyttöisen oikosulkumoottorin kunnonvalvonta

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2023

Matias Tiihonen

Tarkastajat: Apulaisprofessori Lassi Aarniovuori

Tutkijaopettaja Tuomo Lindh

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Matias Tiihonen

Taajuusmuuttajakäyttöisen oikosulkumoottorin kunnonvalvonta

Sähkötekniikan diplomityö

2023

116 sivua, 58 kuvaa, 13 taulukkoa ja 3 liitettä

Tarkastajat: Apulaisprofessori Lassi Aarniovuori ja Tutkijaopettaja Tuomo Lindh

Ohjaaja: Tutkija Hannu Kärkkäinen

Avainsanat: Oikosulkumoottori, taajuusmuuttaja, sähkökäyttö, kunnonvalvonta, staattori, roottori, laakeri, akseli

Tässä diplomityössä tutkittiin taajuusmuuttajakäyttöisen oikosulkumoottorin kunnonvalvontaa olemassa olevan kirjallisuuden ja mittauksien avulla. Mittauksissa mitattiin moottorin sähköisiä suureita tehoanalysointilaitteiden sekä moottorin värinää kiihtyvyyssanturien avulla. Tuloksien perusteella pyrittiin selvittämään, että pätevätkö taajuusmuuttajakäyttöisten ja verkkosyötettyjen oikosulkumoottoreiden vikojen esiintymisestä kertoviin vikaindikaattoreihin samat lainalaisuudet.

Työn mittaustuloksien analysoinnissa keskityttiin suurelta osin moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysiin, mutta laakerivikojen tapauksessa tutkittiin myös moottorin värähtelyn yliaaltosisältöä. Työssä käytiin myös läpi muutaman markkinoilla olevan kunnonvalvontalaitteiston anturien teknisiä ominaisuuksia sekä sitä, millaisia mittauksia laitteistot ylipäänsä tekevät.

Työssä selvisi, että samat teoriat eri vikojen aiheuttamista indikaattoreista olivat pääsääntöisesti päteviä myös taajuusmuuttajakäyttöisillä oikosulkumoottoreilla. Laakerien sisällä olevien komponenttien tarkat mitat jäivät kuitenkin selvittämättä, joten teorian mukaiset laakerien vikaindikaattorit jäivät epätarkoiksi. Tämän vuoksi laakerivikojen osalta vertailu jää tehtäväksi mahdollisiin jatkotutkimuksiin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Matias Tiihonen

Condition Monitoring of an Electrical Motor Driven by a Frequency Converter

Master's thesis

2023

116 pages, 58 figures, 13 tables and 3 appendices

Examiners: Associate Professor (Tenure Track) Lassi Aarniovuori and Associate Professor Tuomo Lindh

Instructor: Researcher Hannu Kärkkäinen

Keywords: Induction motor, frequency converter, electric drive, condition monitoring, stator, rotor, bearing, shaft

In this master's thesis, the condition monitoring of a frequency converter-driven induction motor was investigated with the help of already available literature and measurements. The electrical quantities of the motor with power analyzer and vibrations of the motor with the help of acceleration sensors were measured. Based on the results, an effort was made to find out whether the same theories apply to the fault indicators that indicate about the occurrence of faults in frequency converter-driven and grid-connected induction motors.

In the analysis of the measurement results of the work, the focus was mostly on the frequency analysis of the motor's phase currents, but in the case of bearing faults, also the harmonic content of the motor's vibrations was also investigated. The work also reviewed the technical properties of the sensors of a few condition monitoring equipment available on the market, as well as what kind of measurements the equipment generally are doing.

The work revealed that the same theories about the indicators caused by different faults were generally also valid for frequency converter-driven induction motors. However, the exact dimensions of the components inside the bearings were not determined, so the theoretical bearing failure indicators calculated in work remained inaccurate. Therefore, comparison of bearing defects, remains for possible further studies.

KIITOKSET

Haluan kiittää perheenjäseniäni ja ystäviäni tuesta ja kannustuksesta, mitä sain osakseni tätä diplomityötä tehdessä. Kiitokset myös työn tarkastajille apulaisprofessori Lassi Aarniovuorelle ja tutkijaopettaja Tuomo Lindhille työn ohjaamisesta, ehdotuksista työn parantamiseksi ja neuvoista työssä etenemiseen.

Kiitokset myös LUT:in laboratoriossa työskenteleville ihmisille, joiden työpanos mahdollisti mittausten tekemisen ja muutoinkin työn valmistumisen. Lisäksi haluan erityisesti kiittää tutkija Hannu Kärkkäistä hyväksi osoittautuneista ja hyödyllisiksi osoittautuneista käytännön neuvoista ja mittausdatan analysoinnissa käytetyn MATLAB-koodin tekemisestä.

Lopuksi haluan vielä antaa erityiskiitokset tyttöystävälleni Suville henkisestä tuesta ja läsnäolosta koko diplomityön parissa työskentelyn ajan.

Lappeenranta, 08.05.2023

Matias Tiihonen

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

d	halkaisija	[m]
D	pulssisuhde	
f	taajuus	[Hz]
I	sähkövirta	[A]
j	kokonaisluku	
k	kokonaisluku, kerroin	
N	mittauspisteiden lukumäärä, lukumäärä	
n	kokonaisluku, pyörimisnopeus	[1/min]
p	napaparien lukumäärä	
Q	uraluku	
R	resistanssi	[Ω]
s	suhteellinen jättämä, vinoutus	[m, 1]
t	aika	[s]
	lämpötila	[°C]
T	jaksonaika, vääntömomentti	[s] [Nm]
U	jännite	[V]

v	harmonisen kertaluku
x	aikajatkuva syöttösignaali, signaali
X	diskreetti syöttösignaali
y	aikajatkuva ulostulosignaali
Y	diskreetti ulostulosignaali

Kreikkalaiset

α	kosketuskulma	[°]
τ	jako	[m]

Vakiot

a	vaiheenkääntöoperaattori	$e^{i\frac{2\pi}{3}}$ (eli $1 \angle 120^\circ$)
g	putoamiskiihtyvyys	9,80665 m/s ²

Alaindeksit

bb	vierintäelin (bearing ball)
bc	laakerin kuulien separaattorirengas (bearing cage)
bir	laakerin ulkokehä (bearing inner ring)
bor	laakerin ulkokehä (bearing outer ring)
brb	rikkinäinen roottorisauva (broken rotor bar)
bs	vierintäelimen pyörintä (ball spin)
d	epäkeskisyyden tyyppi
DC	tasavirta tai -jännite (Direct Current)

ecc	epäkeskisyys (eccentricity)
fault	vika
LL	pääjännite (Line-to-Line)
p	napa (pole)
r	roottori (rotor)
s	staattori (stator)
sp	urajako (slot pitch)
sqv	harmonisen v vinoutus
stt	syöttö
ubm	massaepätasapaino (unbalanced mass)
vib	värähtely (vibration)

Lyhenteet

DFT	diskreetti Fourier-muunnos (Discrete Fourier Transform)
DTC	suora vääntömomentin säätö (Direct Torque Control)
EPRI	Electronic Power Research Institute
FFT	nopea Fourier-muunnos (Fast Fourier Transform)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
MMV	magnetomotorinen voima (Magneto-Motive Force)
PWM	pulssinleveysmodulaatio (Pulse-Width Modulation)
RMS	neliöllinen keskiarvo, tehollisarvo (Root Mean Square)
THD	harmoninen kokonaissärö (Total Harmonic Distortion)
THD+N	harmoninen kokonaissärö ja kohina (Total Harmonic Distortion Plus Noise)
U, V, W	merkinnät oikosulkumoottorin staattorikämeille

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
1.1	Tutkimuksessa käsiteltävä ongelma.....	10
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	11
2	Oikosulkumoottorien kunnonvalvonnan perusteet.....	12
2.1	Taajuusmuuttaja	12
2.1.1	Taajuusmuuttajan vaikutus jännitteen käyrämuotoon	14
2.1.2	Modulointialueen laajentaminen.....	15
2.2	Oikosulkumoottorin rakenne.....	15
2.2.1	Oikosulkumoottorin jättämä	18
2.2.2	Virran yliaaltokomponentit.....	18
2.2.3	Oikosulkumoottorin vinoutus (engl. skewing)	21
2.3	Yleiset viat oikosulkumoottoreissa	23
2.3.1	Yleistä staattorikäämityksen vioista	25
2.3.2	Staattorikäämien käämisulku	25
2.3.3	Staattorikäämin kierrossulku	26
2.3.4	Staattorikäämin maasulku	27
2.3.5	Staattorin virtapiirin avautuminen	28
2.3.6	Roottorin sähköiset viat	29
2.3.7	Roottorin ja laakerien mekaaniset viat.....	30
2.3.8	Tehoelektroniikkakomponenttien rikkoutuminen.....	33
2.3.9	Muut viat.....	33
2.4	Menetelmiä vikojen tunnistukseen.....	36
2.4.1	Virran mittaaminen	37
2.4.2	Jännitteen ja virran tehollisarvot.....	38
2.4.3	Virran symmetriset komponentit	39
2.4.4	Fourier-muunnos ja nopea Fourier-muunnos	40

2.4.5	Tehoanalysointori.....	41
2.5	Kaupalliset kunnonvalvontasovellukset.....	41
3	Mittausten kulku ja mittaustulokset.....	43
3.1	Moottorin syöttöviat.....	49
3.2	Staattoriviat	54
3.2.1	Staattorikäämien kierrossulku.....	54
3.2.2	Staattorikäämien käämisulku	61
3.2.3	Staattorikäämien maasulku	64
3.2.4	Moottorin epäsymmetriavika.....	67
3.2.5	Staattorivikojen indikaattoreiden yhteenveto	70
3.3	Roottorisauvaviat	71
3.4	Laakeriviat.....	83
3.5	Moottorin kiinnityksen löystyminen	95
3.6	Moottorin linjausvirheet.....	97
3.7	Akselin massaepätasapainon viat.....	99
3.8	Mittaustuloksien yhteenveto	102
4	Johtopäätökset	105
5	Yhteenveto.....	109
	Lähteet	111

Liitteet

Liite 1. Vikojen vauriotaajuuksia.

Liite 2. Mittauksissa käytettyjen oikosulkumoottorien tyyppikilvet.

Liite 3. Työssä esittämättömiä mittaustuloksia.

1 Johdanto

Oikosulkumoottorit ovat käytössä sekä suoraan verkko- että taajuusmuuttajakäyttöisinä suurissa määrissä eri käyttökohteita, sillä ne ovat kestäviä ja niiden pyörimisnopeutta sekä vääntömomenttia voidaan ohjata tarkasti (Faiz et al. 2017). Tästä syystä erilaisille kunnonvalvonnan sovelluksille on kysyntää, sillä yleensä on kustannustehokkaampaa tehdä ennakoivia huoltotoimenpiteitä, kuin yllättäviä korjauksia. Kunnonvalvonnalla voidaan myös parantaa toimintavarmuutta (Nandi et al. 2005), mikä on varsinkin turvallisuuden kannalta kriittisissä järjestelmissä erittäin tärkeää (Joksimović et al. 2013).

Tässä opinnäytetyössä käsitellään taajuusmuuttajakäyttöisien oikosulkumoottorien kunnonvalvonnan sovelluksia kirjallisuudesta löytyvän tiedon pohjalta, suoritetaan sähköisten suurien mittauksia laboratoriossa taajuusmuuttajakäyttöisellä oikosulkumoottorilla, johon on keinotekoisesti luotu vikoja, ja mittaustulosten perusteella todetaan, että ovatko teorian mukaan lasketut moottorin vaihevirtojen yliaaltokomponenttien esiintymistaajuudet samoja, kuin todellisuudessa esiintyvät taajuudet.

Aihetta käsitellään kuitenkin vain oikosulkumoottoreita silmällä pitäen, mikä jättää tilaa myös mahdollisille jatkotutkimuksille, esimerkiksi saman kaltaisille mittauksille eri moottorityyppjä käyttäen. Ainakin kestromagneettitahtimoottorin ja synkronireluktanssimoottorin staattorit ovat rakenteeltaan oikosulkumoottorin staattorin kaltaisia, joten tietyt vikaindikaattoritkin voivat olla samanlaisia.

Tämän opinnäytetyön rakenne on sellainen, että johdannon loppuosassa käsitellään työssä tehtäviin mittauksiin liittyvää teoriaa. Eri aiheet on jaoteltu johdannon eri alaotsikoiden alle. Johdannon jälkeen käydään läpi, millaisella laitteistolla ja millä menetelmillä mittaukset suoritettiin. Laitteiston ja menetelmien esittelemisen jälkeen työssä käydään läpi mittauksien tulokset. Sitten tuloksia analysoidaan, niistä vedetään johtopäätöksiä ja lopuksi tehdään koko työstä yhteenveto.

1.1 Tutkimuksessa käsiteltävä ongelma

Oikosulkumoottoreiden kunnonvalvontaa on aikaisemminkin tutkittu paljon ja eri vikojen indikaattorit ovatkin jo melko hyvin tunnettuja kirjallisuudessa. Suurin osa tutkimuksista on kuitenkin tehty suoraan sähköverkkoon liitetyillä, eli verkkosyötetyillä moottoreilla. Tässä

työssä selvitetään laboratoriossa tehtävien mittausten avulla, että aiheuttavatko erilaiset viat samankaltaisia indikaattoreita taajuusmuuttajakäyttöisissä oikosulkumoottoreissa, kuin verkkosyötetyissä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, millaisia oikosulkumoottorin kunnonvalvonnan menetelmiä on olemassa ja millaisissa tapauksissa niitä voidaan käyttää. Selvitetään myös, kuinka taajuusmuuttajan käyttäminen moottorin syöttöpuolella vaikuttaa eri menetelmien toimivuuteen. Lopuksi pohditaan, kuinka tarkkoja mittauksia tarvittaisiin, jotta vikoja pystyttäisiin havaitsemaan kunnonvalvonnan kannalta riittävällä tarkkuudella, sillä laboratoriotason laitteistoa ei ole kustannusten ja tilankäytön vuoksi usein mahdollista käyttää.

Tutkimuksen tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Eroavatko taajuusmuuttajakäyttöisen ja verkkosyötetyn oikosulkumoottorin vikojen havainnoinnin menetelmät toisistaan?
- Millaisia mittauslaitteistoja ja -menetelmiä jo olemassa olevat kaupalliset laitteet käyttävät?
- Millaista taajuuskaistaa, mittausepävarmuutta ja herkkyyttä voidaan pitää riittävänä virta-anturille oikosulkumoottorin kunnonvalvonnan kannalta?

Vastauksia ensimmäiseen tutkimuskysymykseen pyritään löytämään moottorin vaihevirtojen ja värinän mittaamisen ja teoriaan vertaamisen kautta. Toiseen tutkimuskysymykseen vastausta etsitään laitevalmistajien tuotekatalogeista ja tämän pohjalta pohditaan viimeistä tutkimuskysymystä. Työn pääpaino on kohdistettu ensimmäiseen tutkimuskysymykseen.

2 Oikosulkumoottorien kunnonvalvonnan perusteet

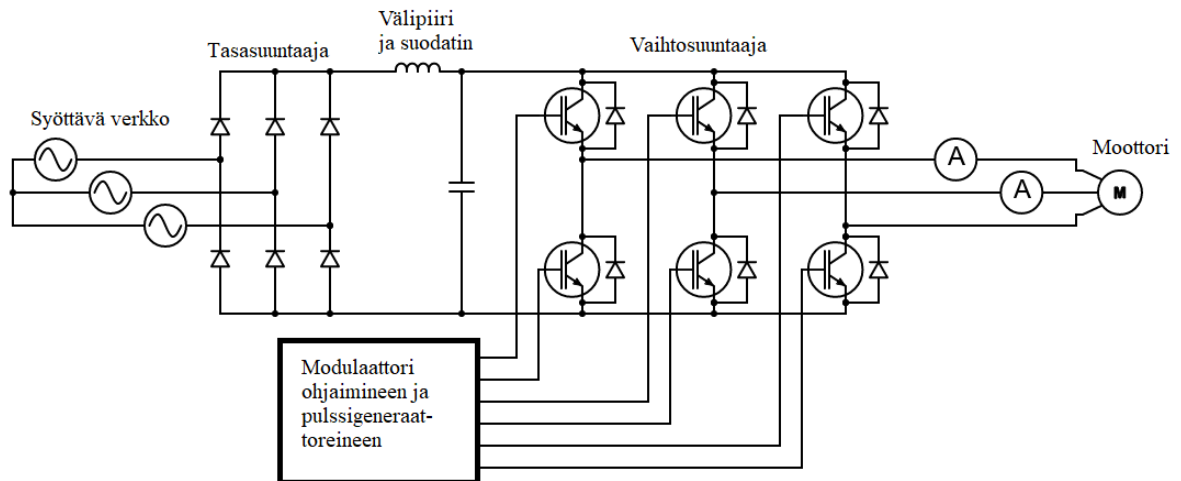
Tässä kappaleessa käsitellään oikosulkumoottorien, taajuusmuuttajien ja kunnonvalvonnan teoriaa olemassa olevan kirjallisuuden pohjalta. Ensin käydään läpi perusteita taajuusmuuttajista ja niiden toiminnasta, sitten oikosulkumoottoreista ja lopuksi kunnonvalvonnan menetelmistä.

2.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on laite, jonka avulla voidaan säätää vaihtojännitteen taajuutta sekä amplitudia (IEC 60050-551 1998). Taajuusmuuttajia on sekä virta- että jännitevälipiirillisiä, mutta jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat ovat markkinoilla huomattavasti yleisempiä (Pyrhönen et al. 2016).

Tänä päivänä on yleistä, että oikosulkumoottoria syötetään taajuusmuuttajalla (Miletic & Cettolo 2003). Taajuusmuuttajaa käytetään jännitteen taajuuden muuntamiseen sähköverkon määrittämästä taajuudesta joksikin muuksi. Tällöin myös moottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia saadaan säädettyä, eikä moottoria tarvitse mekaanisesti jarruttaa nimellistä hitaamman pyörimisnopeuden saavuttamiseksi aiheuttaen huomattavan määrän häviöitä. Syöttävään verkkoon liitetty taajuusmuuttaja ja sähkökone yhdessä muodostavat sähkökäytön (Rahman & Dwivedi 2019).

Kuvassa 2.1 on esitetty taajuusmuuttajan piirikaavio. Taajuusmuuttaja koostuu tasasuuntaajasta, välipiiristä, sekä vaihtosuuntaajasta (Pyrhönen et al. 2016). Joko välipiirissä tasavirtapuolella tai ennen tasasuuntaajaa vaihtovirtapuolella on yleensä suodatin, jolla vähennetään haitallisia verkon puolelta peräisin olevia yliaaltoja (ABB 2001). Tasasuuntaajana voi olla esimerkiksi diodisilta tai IGBT-silta (ABB 2001).



Kuva 2.1. Taajuusmuuttajan piirikaavio (muokattu lähteestä Pyrhönen et al. 2016). Kuvassa taajuusmuuttajaa syötetään sähköverkosta ja sillä syötetään kolmivaihemoottoria.

Taajuusmuuttajien halutaan aiheuttavan mahdollisimman vähän häviöitä, joten suuriresistanssisia komponentteja on vältettävä. Niinpä taajuusmuuttajat rakennetaan mm. kondensaattoreista, keloista, puolijohdekomponenteista ja muuntajista, joilla on mahdollisimman vähän resistanssia. (Rahman & Dwivedi 2019.)

Taajuusmuuttajan toimintaperiaate on sellainen, että taajuusmuuttajalle syötetty vaihtojännite muunnetaan ensin tasajännitteeksi välipiiriin ja tasasuunnatusta jännitteestä voidaan puolestaan muodostaa halutun taajuista vaihtojännitettä kytkiminä toimivien puolijohdekomponenttien avulla. Kytkiminä toimivia puolijohdekomponentteja säädetään johtamaan ja olemaan johtamatta vuorotellen suurella taajuudella, jolloin tasajännitteestä muodostuu pulssimainen jännite prosessin energiahäviöiden jäädessä pieniksi, mikäli komponentit on mitoitettu oikein. Pulssien päälläoloaika, eli leveyttä aika-akselilla, säädetään halutunlaiseksi. (Rahman & Dwivedi 2019.)

Kun oikosulkumoottoria syötetään taajuusmuuttajalla, joidenkin vikojen havaitseminen varsinkin staattorivirran taajuuksien analysointiin perustuvien menetelmien avulla on hankalampaa kuin suoraan verkosta moottoria syötettäessä. Tämä johtuu mm. siitä, taajuusmuuttajan käyttäminen aiheuttaa staattorivirtaan ylimääräisiä yliaaltoja esimerkiksi tasasuuntauksen, sekä PWM-ohjauksen vuoksi. (ABB 2001; Miletic & Cettolo 2003.)

Nämä yliaallot on mahdollista sekoittaa vikojen aiheuttamisiin yliaaltoihin ja lisäksi oikeidenkin vikojen aiheuttamat amplitudit taajuustasossa voivat olla pienempiä taajuusmuuttajaa käytettäessä, jolloin vika näyttää pienemmältä kuin mitä se on, tai sitä ei välttämättä ole ollenkaan nähtävissä. (Miletic & Cettolo 2003.)

Taajuusmuuttajakäytön hyviä puolia kunnonvalvonnan kannalta ovat mm. mahdollisuus muuttaa moottorin pyörimisnopeutta ja se, etteivät verkon taajuudenvaihtelut vaikuta syöttöjännitteen taajuuteen. Pyörimisnopeuden ja vääntömomentin muuttaminen mahdollistavat mittauksen tekemisen eri toimintapisteissä. Myös kuormakoneen säätämisestä taajuusmuuttajan avulla on todennäköisesti hyötyä, sillä kuorman suuruus vaikuttaa jättämän arvoon, joka taas vaikuttaa tiettyihin vikaindikaattoreihin.

2.1.1 Taajuusmuuttajan vaikutus jännitteen käyrämuotoon

Modulaatiota on toisen signaalin, eli taajuusmuuttajien tapauksessa ulostulon jännitteen muokkaaminen toisella signaalilla. Modulaatiolla saadaan aikaan logiikkasignaali, jota kytkiminä käytetyt puolijohteet seuraavat ja joko johtavat tai eivät johda sähkövirtaa lävitseen, halutulla pulssisuhteella D (Erickson & Maksimović 2020). Yleisimmät taajuusmuuttajien hyödyntämät pulssinleveysmodulaation (PWM) tavat ovat sinikolmiovertailu ja avaruusvektorimodulointi (Hren & Mihalič 2018).

Eniten käytetty menetelmä, sinikolmiovertailu, perustuu eri vaiheiden referenssisignaalien, jotka yleensä ovat sinimuotoisia, sekä kytkentätaajuuden mukaisen sahalaitasignaalin vertailuun (Holtz 1994). Kun vaiheen referenssisignaali on arvoltaan suurempi kuin vertailun vuoksi luotu sahalaitasignaali, on vaiheen ulostulo 1, muulloin 0 (Erickson & Maksimović 2020).

Toista paljon käytettyä menetelmää, avaruusvektorimodulaatiota, käyttäessä tarvitaan vain yksi referenssisignaali jännitteelle, vaikka järjestelmä olisikin kolmivaiheinen (Holtz 1994). Tämä referenssisignaali muodostetaan staattisen koordinaatiston referenssijännitteistä. (Rahman & Dwivedi 2019). Referenssisignaali määrittää, mitkä kytkimet ovat milloinkin päällä ja mitkä pois päältä (Pyrhönen et al. 2016). Tämän vuoksi erillistä modulaattoria ei tarvita.

2.1.2 Modulointialueen laajentaminen

Sinikolmiovertailua käytettäessä kaikki välipiirin jännite ei ole hyödynnettävissä, vaan vaihtosuuntaajan ulostulon vaihejännitteen amplitudiksi saadaan maksimissaan $\frac{\sqrt{3}}{2}U_{DC}$ (Holtz 1994) ja pääjännitteen tehollisarvo on yhtälön 2.16 mukaisesti $\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}}U_{DC}$. Diodisillan tasasuunnatessa jännitettä, muodostuu välipiirin jännitteeksi $\frac{3\sqrt{2}}{\pi}U_{LL}$, jossa U_{LL} on syöttävän verkon pääjännitteen tehollisarvo. Tämä tarkoittaa sitä, että sinikolmiovertailua käytettäessä vaihtosuuntaaja saa tuotettua vaihtojännitettä, jonka amplitudin tehollisarvo on vain $\frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \approx 0,83$ kertainen taajuusmuuttajaa syöttävän verkon vaihtojännitteen tehollisarvoon nähden. (Pyrhönen et al. 2016.)

Taajuusmuuttajissa ylimoduloinnin avulla saadaan välipiirin jännitteen amplitudista suurempi osa käyttöön. Laajalti tunnettu ja käytetty menetelmä on kolmannen harmonisen komponentin, eli symmetrisien järjestelmien nollakomponentin, lisääminen ohjesignaaliin (Hren & Mihalič 2018). Kolmas harmoninen yliaaltokomponentti ohjesignaaliin saa aikaan sen, että sinikolmiovertailun lineaarista aluetta saadaan jatkettua pidemmälle, eli korkeampiakin jännitteitä päästään hyödyntämään (Pyrhönen et al. 2016). Myös erilaisia aaltomuotoja, kuten suorakaiteen muotoisia aaltomuotoja, voidaan lisätä (Holtz 1994).

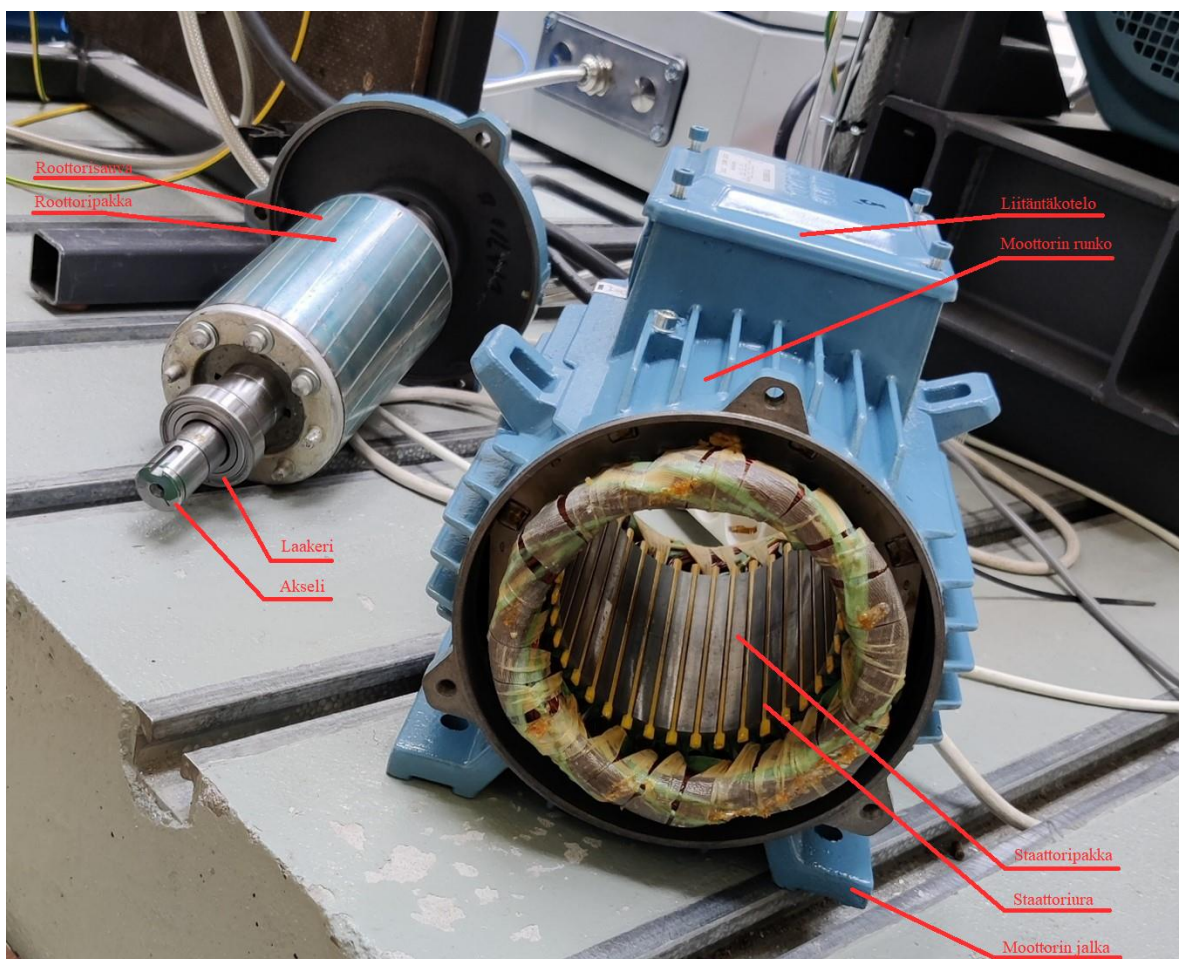
Ylimoduloinnin huonoja puolia ovat mm. haitallisten yliaaltojen amplitudien nousu vaihtosuuntaajan tuottamassa jännitteessä päätaajuuden amplitudiin verrattuna, sekä laitteen kuormitettavuuden lasku (Hren & Mihalič 2018). Ylimoduloinnista on kuitenkin hyötyä esimerkiksi sellaisessa tapauksessa, kun eri pyörintänopeuksia vaativassa käyttökohteessa halutaan syöttää moottoria myös verkkotaajuudella ilman ajon keskeytyksiä.

2.2 Oikosulkumoottorin rakenne

Oikosulkumoottorissa on pyörivä roottori, staattori, pyörimisliikkeen mahdollistavia laakereita, moottorin runko sekä päätykilvet. Moottorin runko on yleensä valmistettu alumiinista, valuraudasta tai hitsaamalla teräslevyistä (Karmakar et al. 2016). Roottori koostuu pyörivästä akselista, roottorisauvoista sekä roottorin päätyrenkaista, kun taas staattori koostuu staattoripakasta ja staattorikäimityksestä (Faiz et al. 2017).

Oikosulkumoottorin roottori on häkkikämmetty, eli se koostuu roottorisauvoista, sekä sauvojen päästä sauvat yhdistävästä oikosulkurenkaasta. Nämä on yleensä valmistettu valamalla alumiinista tai hitsaamalla kuparista (Pyrhönen et al. 2016). Roottorisauvojen keskellä on roottoripakka, joka valmistetaan puristamalla yhteen ohuita piiteräslevyjä, eli lamelleja, joissa on urat roottorisauvoille ja eristävää sekä kosteudelta suojaavaa lakkaa välissä (Karmakar et al. 2016). On olemassa myös epätahtimoottoreita, joissa on myös roottorissa käämitys roottorisauvojen ja oikosulkurenkaiden sijaan. Tällöin kyseessä on liukurengasroottorinen moottori. (Faiz et al. 2017.)

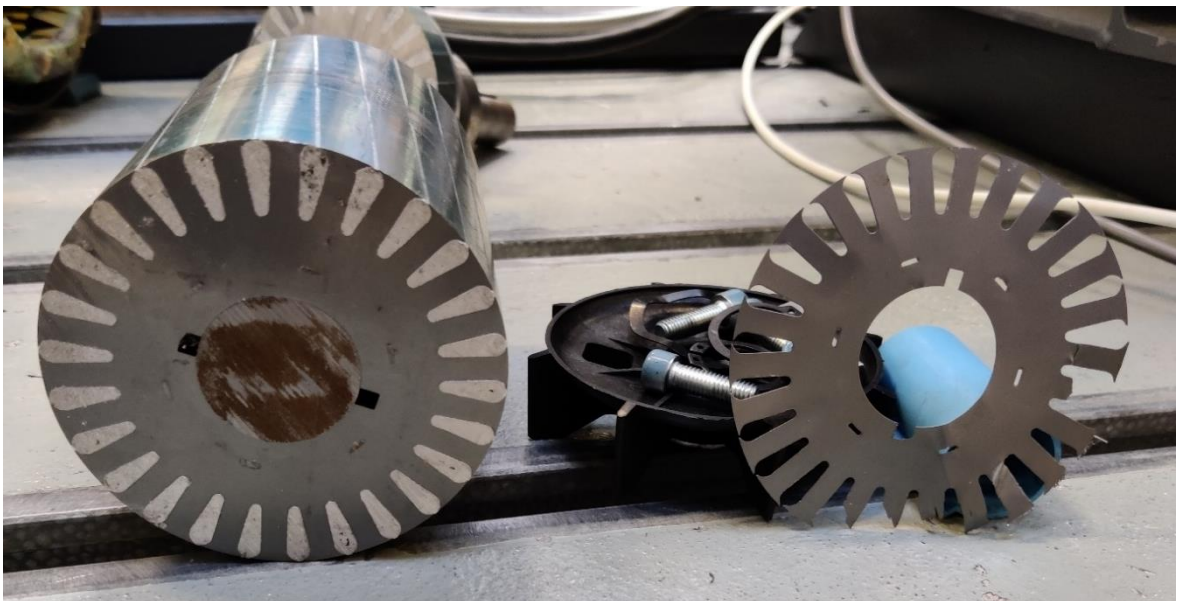
Kuvassa 2.2 on esitetty purettu oikosulkumoottori. Kuvassa oikealla on nähtävillä moottorin runko, jonka sisällä staattori on, ja vasemmalla irrotettu roottori, jossa laakerit ovat yhä kiinni. Kuvaan on myös merkittynä siinä näkyviä rakenneosia.



Kuva 2.2. Oikosulkumoottori, jonka roottori on otettu irti. Kuvassa roottori on näkyvissä vasemmalla ja moottorin runko sekä staattori oikealla. Toinen roottorin ja staattorin välisistä

laakereista on nähtävissä akselin ympärillä. Staattorikäämit on sijoitettu kuvassa näkyviin staattoriuriin eristemateriaalien keskelle.

Kuvassa 2.3 on esitetty poikittaissuunnassa halkaistu häkkikäämitty roottori, sekä yksi sen lamellikerros. Kuvasta nähdään myös roottorisauvojen asettelu poikittaissuunnassa.



Kuva 2.3. Oikosulkumoottorin häkkikäämitty roottori (vasemmalla) sekä sen rautasydämeistä irti leikattu lamellikerros (oikealla). Kuvassa näkyvät selvästi rautasydämen keskellä oleva akseli, sekä rautasydämen lamellien ulkoreunoissa oleviin uriin valetut alumiiniset roottorisauvat.

Staattori on moottorin rungossa kiinni oleva osa, jonka staattorikäämeihin syötetään sähkövirtaa. Nämä staattorikäämit sijaitsevat eristettyinä staattoripakan staattoriurissa (Faiz et al. 2017). Staattorikäämien eristämiseksi toisistaan ja rungosta käytetään esimerkiksi staattoriurissa polyesterikalvoa, joka on mekaanisesti kestävä materiaali (Pyrhönen et al. 2014). Staattorikäämejä ja johtimia myös kylästetään erilaisilla lakoilla, mikä parantaa niiden lämmönjohtavuutta, sekä suojelee niitä kemikaaleilta ja kosteudelta (Pyrhönen et al. 2014). Staattori- ja roottoripakat on tehty piiteräslevyistä, koska näin voidaan vähentää moottorin pyörrevirtoja ja siten häviöitä sekä käytönaikaista lämpenemistä. (Karmakar et al. 2016.)

Staattorikämeissä kulkevien staattorivirtojen vaikutuksesta syntyy ilmväliin pyörivä magneettikenttä. Kun roottori pyörii eri nopeutta kuin tahtinopeutta, ilmvälin magneettikentän vuot leikkaavat roottorisauvoja, jolloin muodostuu aaltomainen magnetomotorinen voima (MMV), joka indusoi roottorisauvoihin roottorivirtoja. Koska roottorivirrat kulkevat roottorisauvoissa, magneettikentän vuo leikkaa myös niitä. Tällöin virta ja magneettikenttä saavat aikaan Lorentzin voiman. Tämä voima saa laakeroidussa roottorissa aikaan vääntömomentin, jonka avulla roottori saadaan pyörimään. (Pyrhönen et al. 2016.)

Roottoriin indusoituvan jännitteen amplitudi ja taajuus riippuvat siitä, kuinka paljon roottorin ja staattorin sähköiset kulmataajuudet eroavat toisistaan. Jos nämä kulmataajuudet olisivat täsmälleen samat, niin roottoriin ei indusoituisi jännitettä eikä siinä tällöin kulkisi roottorivirtojakaan eikä moottori tuottaisi vääntömomenttia. (Pyrhönen et al. 2016.)

2.2.1 Oikosulkumoottorin jättämä

Jättämä on ero roottorin pyörimisnopeuden ja tahtinopeuden, eli staattorin magneettikentän nopeuden, välillä (Pyrhönen et al. 2016). Oikosulkumoottorissa esiintyy sen toimintaperiaatteen vuoksi käytettäessä jättämää, jonka suuruus riippuu moottorin kuormasta. Suuremmalla kuormalla jättämä on suurempi kuin pienemmällä kuormalla tai ilman kuormaa, joten suuremmalla kuormalla roottorin mekaaninen pyörimisnopeus on hieman pienempi kuin pienemmällä kuormalla. (Faiz et al. 2017.)

Oikosulkumoottorin jättämän voi laskea esimerkiksi kulmanopeuksien tai pyörimisnopeuksien avulla seuraavalla yhtälöllä

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{f_s - p \frac{n_r}{60}}{f_s}, \quad (2.1)$$

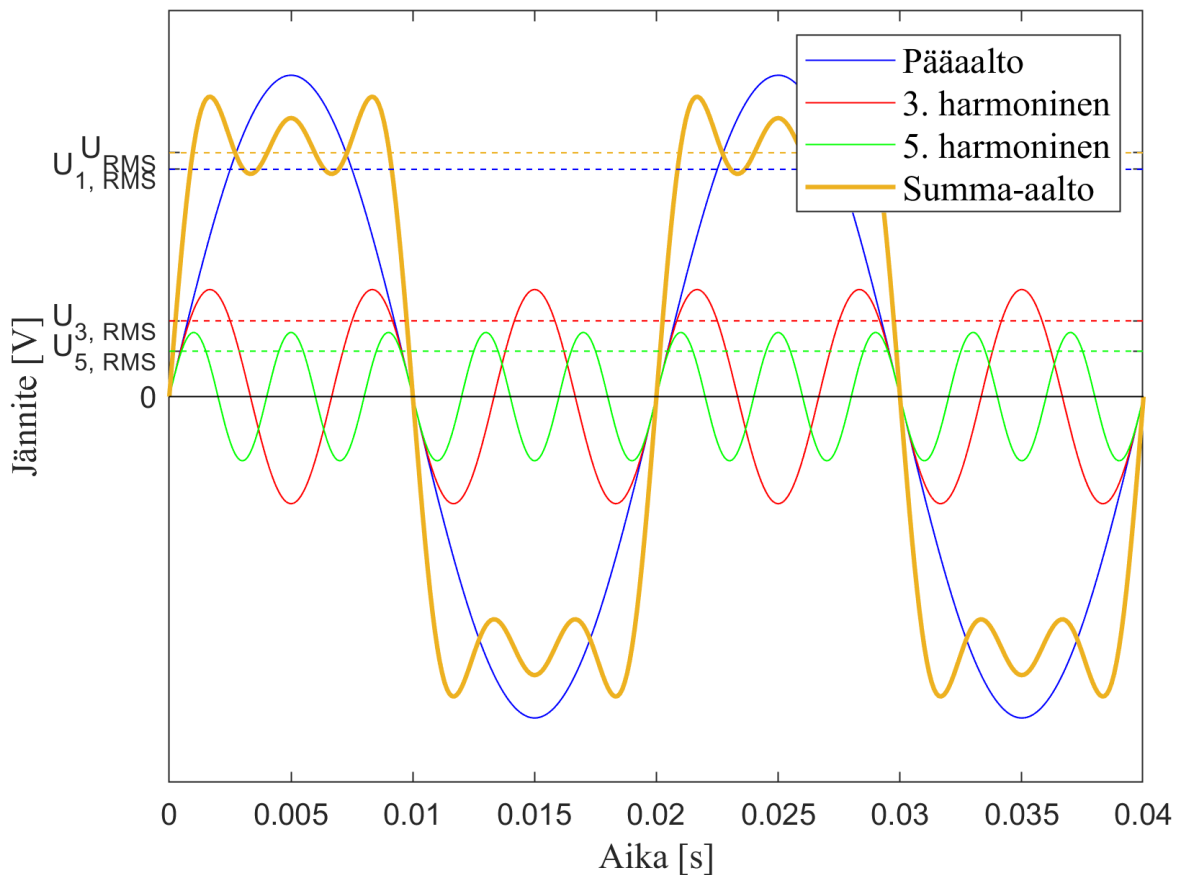
jossa s on suhteellinen jättämä, n_s on tahtinopeus, n_r on roottorin pyörimisnopeus, p on moottorin napapariluku ja f_s on syöttövirran päätaajuus (Faiz et al. 2017).

2.2.2 Virran yliaaltokomponentit

Virrassa esiintyy päätaajuuden lisäksi mm. epälineaaristen kuormien vuoksi yliaaltoja, jotka ovat virtoja, joiden taajuus eroaa päätaajuudesta (Energiateollisuus 2014). Harmoniset ovat yliaaltoja, joiden taajuudet ovat perustaajuuden monikertoja, ja joiden suhde perustaajuuteen nähden on enemmän kuin yksi (IEEE Std 519 2014). Esimerkiksi päätaajuuden ollessa

50 Hz, on 5. harmonisen taajuus 250 Hz. Mikäli yliaaltokomponentti ei ole harmoninen, eli sen taajuus ei ole päätaajuuden monikerta, on se tällöin epäharmoninen yliaaltokomponentti (Energiateollisuus 2014). Kolmivaihejärjestelmässä parillisten monikertojen harmoniset kumoavat toisensa (Das 2015). Harmonisia kutsutaan myös yliaalloiksi (Jokela 2006). Yliaaltosisällön määrää on haluttu rajoittaa standardein, kuten esimerkiksi taajuusmuuttaja-moottorikäyttöjä koskevassa standardissa SFS-EN 61800-3 (ABB 2001).

Aaltomuodoltaan absoluuttisen sinimuotoista signaalia kutsutaan aikaharmoniseksi (Jokela 2006). Kuvaaja esimerkkitapauksesta, jossa jännitteeseen vaikuttaa pääaallon lisäksi sen 3. ja 5. monikerta, on esitetty kuvassa 2.4. Useissa käytännön sovelluksissa jännitteessä ja virrassa kuitenkin esiintyy yliaaltokomponentteja. Esimerkiksi taajuusmuuttajakäytössä yliaaltokomponentteja esiintyy erittäin runsaasti taajuusmuuttajan moduloinnin vuoksi. Myös taseuntaajat ja moottorit aiheuttavat yliaaltoja virtaan (ABB 2001).



Kuva 2.4. Esimerkkikuva päätaajuuden harmonisten yliaaltokomponenttien vaikutuksista jännitteeseen. Pääaallon lisäksi tässä esimerkissä jännitteeseen vaikuttaa 3. ja 5. harmoninen

komponentti. Summa-aalto on näistä komponenteista, pääaalto mukaan lukien, koostuva aalto.

Oikosulkumoottoreissa harmonisia komponentteja esiintyy, vaikka moottori olisi täysin ehjä ja sitä syötettäisiin ideaalisen sinimuotoisella jännitteellä (Asad et al. 2019). Tämä johtuu mm. staattoriurien sekä staattorikämmien rakenteesta (Pyrhönen et al. 2014).

Virran harmonisien vaikutukset riippuvat siitä, monettako päätaajuuden monikertaa ne ovat. Mikäli harmonisen kertaluku on muotoa $3k+1$, jossa k on jokin kokonaisluku, kuuluu harmoninen komponentti myötäjärjestelmään. Jos taas harmonisen kertaluku on muotoa $3k+2$, kuuluu se vastajärjestelmään ja jos se on muotoa $3k$, kuuluu se nollajärjestelmään. Näistä nollajärjestelmän komponentit ovat sellaisia, että niiden virrat summautuvat nollajohtimessa kulkeviksi virroiksi kolmivaihejärjestelmässä. Myötäjärjestelmän komponentteja ovat siis esimerkiksi päätaajuuden lisäksi sen monikerrat 7 ja 13, vastajärjestelmän komponentteja ovat monikerrat 5 ja 11 ja nollajärjestelmän 3 ja 9 (Das 2015.)

Harmoniset virtakomponentit aiheuttavat erilaisia ongelmia kolmivaihejärjestelmissä. Vastajärjestelmän harmoniset virtakomponentit voivat mm. pienentää moottorin tuottamaa vääntömomenttia, kasvattaa moottorin melutasoa, kasvattaa moottorin tärinän voimakkuutta sekä aiheuttaa tehohäviöitä, eli laskea hyötysuhdetta (Joksimović et al. 2019). Nollajärjestelmään kuuluvat virtakomponentit johtavat myös odotettua suurempiin nollajohtimessa kulkeviin virtoihin, mitkä johtavat lämpenemiseen ja siten järjestelmän komponenttien käyttöiän lyhenemiseen. (Erickson & Maksimović 2020.) Harmoniset komponentit ovat siis epätoivottu ilmiö myös moottorissa.

Harmonisien komponenttien tehollisarvojen suhdetta päätaajuuden tehollisarvoon voidaan kuvata harmonisella kokonaissäröllä (THD). IEEE:n standardin mukainen huomioon otettavien harmonisien komponenttien määrä THD:ta laskettaessa on 50 kappaletta, mutta tiettyissä tapauksissa voi olla hyödyllistä ottaa myös tätä korkeampia yliaaltokomponentteja huomioon. THD:n voi laskea sekä jännitteelle että virralle. Virran THD:n arvo voidaan laskea yhtälöllä

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1}, \quad (2.2)$$

jossa I on sähkövirran kunkin yliaaltokomponentin tehollisarvo, missä indeksillä n merkitään harmonisen kertalukua, eli 1 merkitsee päätaajuutta ja muut päätaajuuden kerrannaisia, ja N on huomioon otettavien harmonisien komponenttien määrä (ANSI/IEEE Std 519 1981). (IEEE Std 519 2014.)

Joskus voi olla tarpeen tarkastella myös kohinan vaikutusta harmonisten komponenttien lisäksi. THD:n arvoon voidaan laskea mukaan myös kohinakomponentit, jolloin saadaan harmonisen kokonaissärön ja kohinan (THD+N) arvo. Virran THD+N:än arvo voidaan laskea yhtälöllä

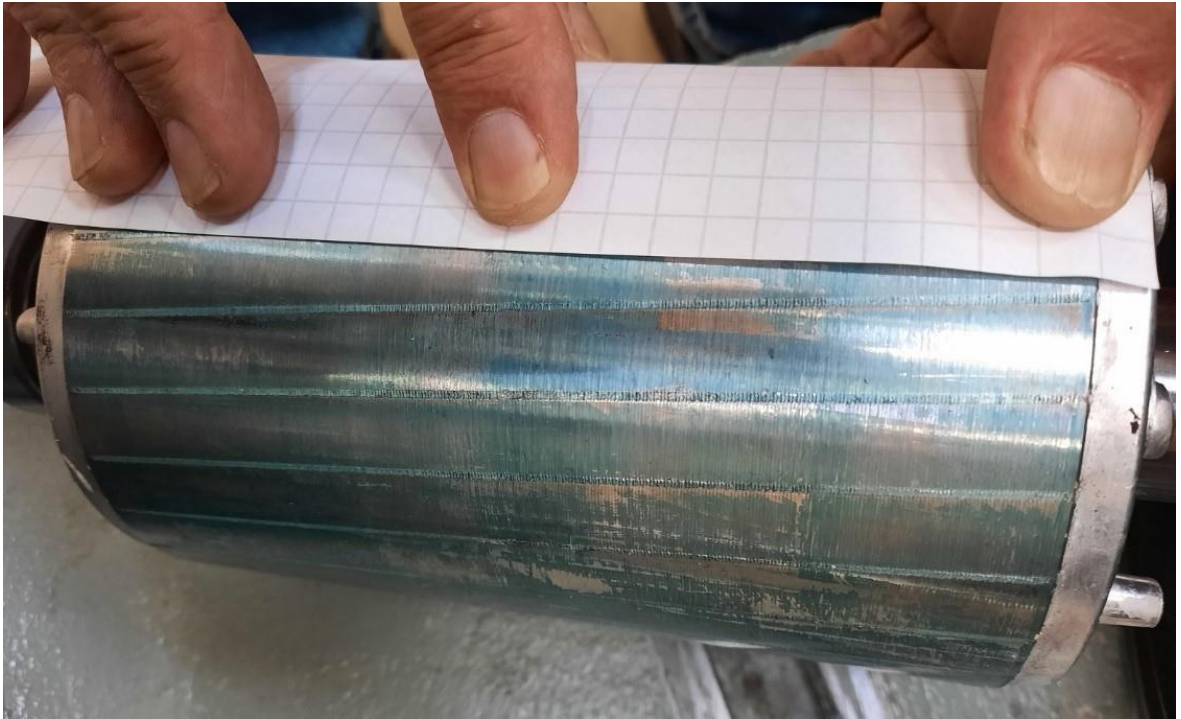
$$THD + N = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2 + I_{\text{kohina}}^2}}{I_1}, \quad (2.3)$$

jossa I_{kohina} on sähkövirrassa esiintyvän kohinan tehollisarvoa kuvaava komponentti. Sekä THD:n että THD+N:än arvot voidaan esittää sekä prosentteina, että desibeleinä. (IEEE Std 1658-2011 2012.)

2.2.3 Oikosulkumoottorin vinoutus (engl. skewing)

Roottorisauvoja vinoutetaan siten, että ne sijoitetaan roottoripakkaan siten, että ne eivät ole täysin suorassa roottorin pituussuuntaan nähden, vaan niillä on vinoutuskulma (Gundogdu et al. 2018). Myös staattoriuria on mahdollista vinouttaa, mutta roottorisauvojen vinoutus on yleisempää (Pyrhönen et al. 2014). Kuvassa 2.5 on esitettyinä vinoutettu roottorisauva, jota on vinoutettu yhden roottorisauvojen välin verran sivuttaissuuntaisesti koko roottorin pituudelta.

Roottorin vinoutuksella pyritään mm. pienentämään korkeampia moottorin staattorivirran epäideaalisuuksien aiheuttamia harmonisia yliaaltokomponentteja (Joksimović et al. 2019). Tämän ansiosta myös moottorin tuottaman vääntömomentin värähtely pienenee, mutta kuitenkin tärkein asia, mitä vinoutuksella pyritään saavuttamaan, lienee kuitenkin staattoriurien rakenteesta johtuvien harmonisten komponenttien vaimentaminen (Gundogdu et al. 2018). Vinoutuksen vaikutukset ovat sitä voimakkaampia, mitä enemmän moottoria kuormitetaan, ja mitä suurempi on moottorin pyörimisnopeus (Gundogdu et al. 2018).



Kuva 2.5. Vinoutettuja roottorisauvoja roottorissa. Suorakulmaisen paperin avulla voidaan selvittää, kuinka suuressa kulmassa roottorisauvat ovat päätyrenkaisiin nähden.

Vinoutuksen vaikutusta roottoriin indusoituvaa jännitteeseen kuvaa vinoutuskerroin k_{sqv} , joka riippuu vinoutuksen kulmasta. Vinoutuskerroin voidaan laskea yhtälöllä

$$k_{sqv} = \frac{\sin\left(v \frac{\pi}{2} \frac{s_{sp}}{Q_s}\right)}{v \frac{s_{vin}}{\tau_p} \frac{s_{sp}}{2p}}, \quad (2.4)$$

jossa k_{sqv} on vinoutuskerroin harmoniselle, jonka kertaluku on v , s_{sp} kuvaa vinoutuksen suuruutta urajakojen määränä, s_{vin} on vinoutuksen vuoksi uran eri päiden välistä matkaa kappaleen kehällä metreinä, τ_p on napajako, Q_s on staattoriurien määrä ja p on napaparien lukumäärä. (Pyrhönen et al. 2014.)

Tämän työn mittauksissa käytetyn moottorin roottoria on vinoutettu yhden staattoriuran verran, kuten kuvasta 2.5 näkyy. Sama moottori on kolmivaiheinen ja sen napapariluku on 2 (ABB 2021). Moottorissa laskettiin olevan 36 staattoriuraa. Kun roottorin vinoutus on yhden urajaan verran, niin yhtälö 2.4 saadaan muotoon

$$k_{sqv} = \frac{\sin\left(v\frac{\pi}{2}\frac{1}{Q_s}\right)}{v\frac{\pi}{2}\frac{1}{Q_s}}, \quad (2.5)$$

jossa käytetyt muuttujat ovat samoja kuin yhtälössä 2.4 (Pyrhönen et al. 2014).

Yhtälön 2.5 perusteella voidaan laskea vinoutuskerroin eri harmonisille tämän työn mittauksissa käytetylle moottorille. Nämä arvot löytyvät taulukosta 2.1.

Taulukko 2.1. Yhtälön 2.5 avulla lasketut vinoutuskertoimet harmonisien eri kertaluvuille.

v	1	3	5	7	9	11	13	15	17
k_{sqv}	0,9949	0,9549	0,8778	0,7691	0,6366	0,4895	0,3376	0,1910	0,0585

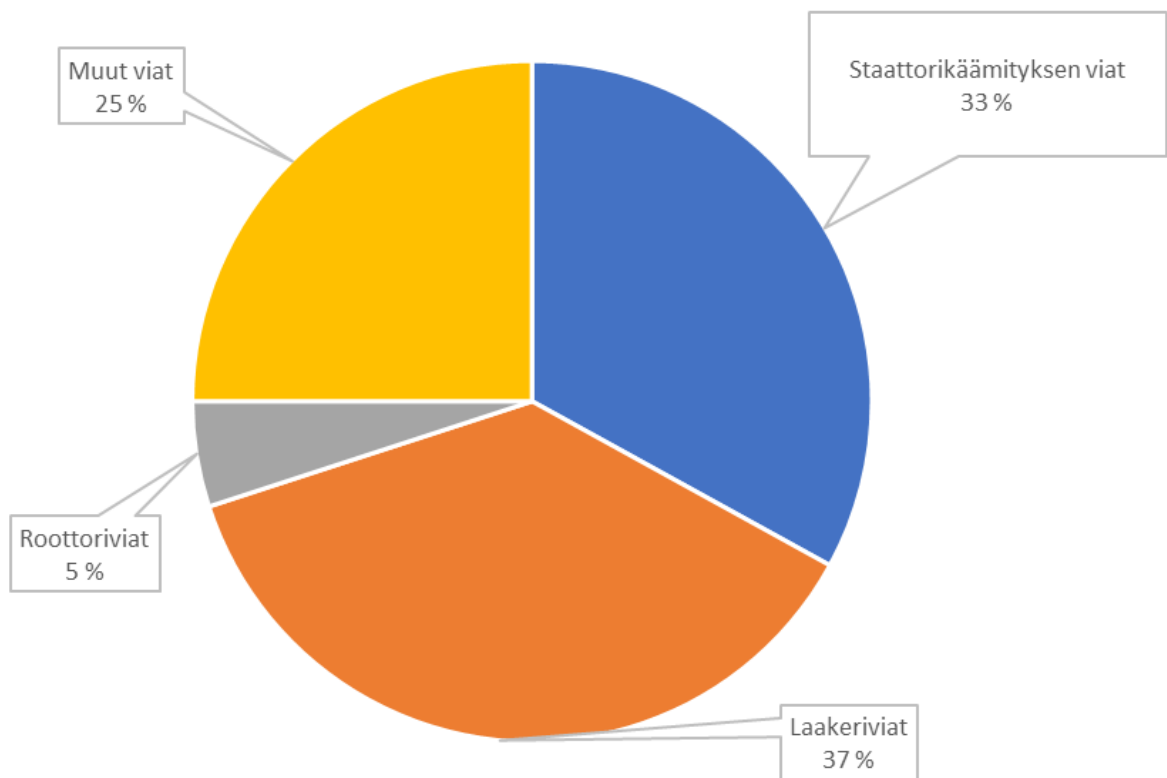
Taulukon 2.1 arvojen perusteella voidaan sanoa, että yhden urajaon verran vinouttamisella ei ole päätaajuuteen suurta vaikutusta, sillä sen vaikutus on vain noin 0,5 %. Seitsemännentoista kertaluvun yliaalto taas on jo vaimentunut huomattavasti.

Vinoutuskulman kasvaessa roottorin resistanssi kasvaa, joten roottoriin indusoidun virran amplitudi pienenee. Myös magneettivuontiheys pienenee sekä staattorissa että roottorissa vinoutuskulman kasvaessa. Nämä vaikutukset vähentävät sekä ääntä, että moottorista lähtevää ääntä, ja saavat moottorin käyntiin lähtiessä tarjoaman vääntömomentin kasvamaan, mikä nopeuttaa kiihdytystä paikaltaan lähettäessä, mutta toisaalta taas moottorin keskimäärin tuottama vääntömomentti laskee hiukan. Myös kupari- ja rautahäviöt kasvavat jonkin verran, joten moottorin hyötysuhde kärsii vinoutuksesta. (Gundogdu et al. 2018.)

2.3 Yleiset viat oikosulkumoottoreissa

Sähkömoottorit, kuten oikosulkumoottorit, ovat nauttineet maineestaan lujatekoisina ja vähävikaisina moottoreina (Karmakar et al. 2016; Lindh 2003). Tämä on yksinkertaisen perusrakenteen ansiota. Oikosulkumoottoreiden viat voidaan luokitella muutamaan kategoriaan. On staattorin käämityksen vikoja, roottorin sähköisiä vikoja, roottorin mekaanisia vikoja ja moottorinohjauksessa käytetyn tehoelektroniikan vikoja, jotka eivät tosin varsinaisesti kuulu itse moottorin vikoihin (Joksimović et al. 2013). Liitteessä 1 on esitetty muutamien eri vikojen aiheuttamien yliaaltokomponenttien esiintymistajuuksia eri havainnointimenetelmillä.

Kuvassa 2.6 on esitetty piirakkakuvaaja, josta nähdään oikosulkumoottorien hajoamiseen johtaneiden yleisimpien vikaantuvien osien suhteelliset vikaantumismäärät kaikkien vikaantumisien määrään suhteutettuna. Kuvaaja on tehty käyttäen Institute of Electrical and Electronics Engineersin (IEEE) ja Electric Power Research Institutun (EPRI) raporttien tuloksien keskiarvoja. (Ferreira et al. 2016.)



Kuva 2.6. Piirakkakuvaaja staattorikäätymisen vikojen, laakerivikojen, roottorivikojen ja muiden vikojen tilastollisesta yleisyydestä kaikkien vikojen määrään nähden (Ferreira et al. 2016).

Kuten kuvasta 2.6 nähdään, oikosulkumoottorien yleisimpiä vikoja ovat laakerivikat ja toiseksi yleisimpiä taas staattorikäätymisen vikat. Joskus useampikin vika voi ilmetä päällekkäin. Useammatkin vikat aiheuttavat samankaltaisia aistein havaittavissa olevia oireita oikosulkumoottoriin, kuten ylikuumentumista, ylimääräistä tärinää sekä moottorin hyötysuhteen heikkenemistä. (Karmakar et al. 2016; Ferreira et al. 2016.)

2.3.1 Yleistä staattorikäämityksen vioista

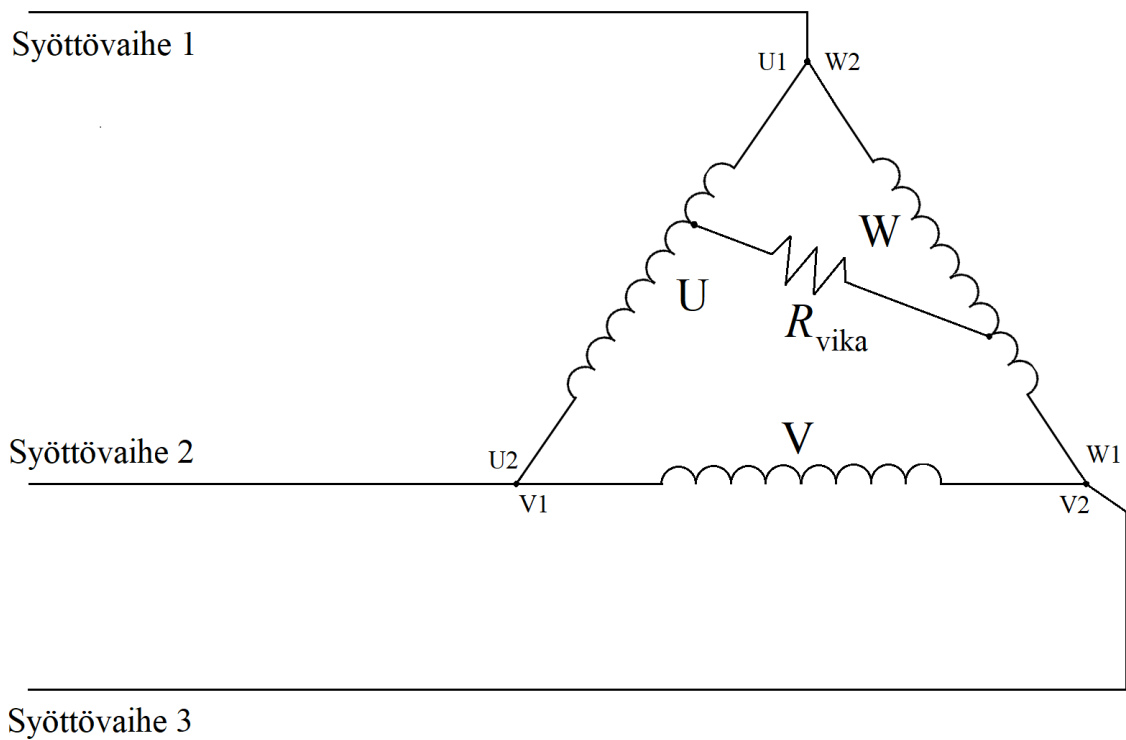
Yleisin syy staattorikäämityksen vikaantumiselle on eristyksen pettäminen, mikä saattaa johtua esimerkiksi ylikuumentumisesta, toisesta oikosulkuviasta tai koneeseen pääsevästä öljystä, kosteudesta tai hiekasta (Nandi et al. 2005). Kuten kuvasta 2.6 nähdään, noin kolmasosa oikosulkumoottorien vioista aiheutuu staattorikäämityksestä (Ferreira et al. 2016). Myös moottorin altistuminen koville värähtelyille voi aiheuttaa näitä vikoja, erityisesti yhden tai useamman vaiheen avautumista (Karmakar et al. 2016). Jos staattorivikainen moottori on pieni, se yleensä korvataan uudella, sillä korjaaminen vaatii asiaan perehtyneen ammattilaisen, jos moottorin staattori pitää uudelleen käännyttää (Lindh 2003).

Staattorikäämityksen oikosulkuviat aiheuttavat epätasapainoa eri vaiheiden staattorivirtojen välille, mikä johtaa muun muassa moottorin pyörimisnopeuden ja vääntömomentin epätasaisuuksiin (Faiz et al. 2017). Suuret epätasapainot vaiheiden välillä on myös mahdollista kuulla äänestä moottorin ollessa käytössä.

Staattorikäämitykseen voi tulla useita erilaisia vikoja. Staattorikäämityksessä voi syntyä oikosulku eri staattorikäämien välille, staattorikäämin ja maan välille tai saman käämin eri käämikierrosten välille (Faiz et al. 2017; Nandi et al. 2005). Myös yksittäinen vaihe voidaan menettää kokonaan, esimerkiksi kytkennän pettäessä, mikä ei välttämättä edes estä moottoria pyörimästä (Karmakar et al. 2016). Näitä eri tilanteita tarkastellaan erikseen tässä kappaleessa.

2.3.2 Staattorikäämien käämisulku

Staattorikäämin oikosulkeutuessa toiseen staattorikäämiin kuvan 2.7 kytkennän mukaisesti, tapahtuu käämisulku. Käämisulussa virtaa pääsee suoraan tai mahdollisesti jonkin vikaresistanssin R_{vika} kautta kulkemaan suunnittelematonta reittiä pitkin. Vika voi syntyä esimerkiksi lämpenemästä johtuvien eristeaurioiden seurauksena.

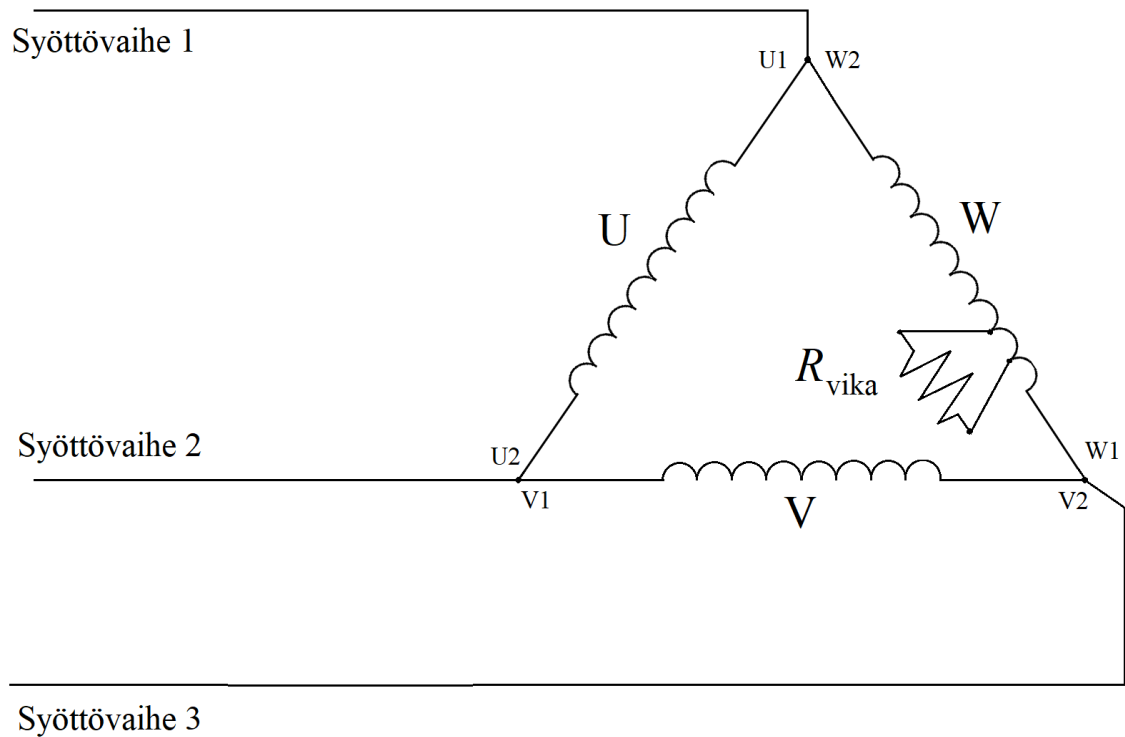


Kuva 2.7. Staattorikäämien välille on tullut oikosulku, eli käämisulku, vikavastuksen R_{vika} kautta.

Käämisulku kasvattaa vastakomponentin arvoja, aiheuttaa epäsymmetriaa staattorivirroissa ja saa moottorin tärisemään syöttötaajuuteen nähden kaksinkertaisella taajuudella (Lindh & Partanen 1999). Kuvassa 2.7 on moottorin staattorikäämeihin viitattu kirjaimilla U, V ja W ja moottoria syöttäviin vaiheisiin taas numeroilla 1, 2 ja 3.

2.3.3 Staattorikäämin kierrossulku

Vikaa, jossa saman staattorikäämin käämikierroksia oikosulkeutuu kuvan 2.8 kytkennän mukaisesti, kutsutaan kierrossulkuksi. Kierrossulussa virtaa pääsee suoraan tai mahdollisesti jonkin vikaresistanssin R_{vika} kautta kulkemaan tiettyjen käämikierrosten rinnalla. Tämä aiheuttaa eroavaisuutta eri staattorikäämien käämikierrosten määrässä ja siten myös epätasapainoa MMV:n amplitudeissa.

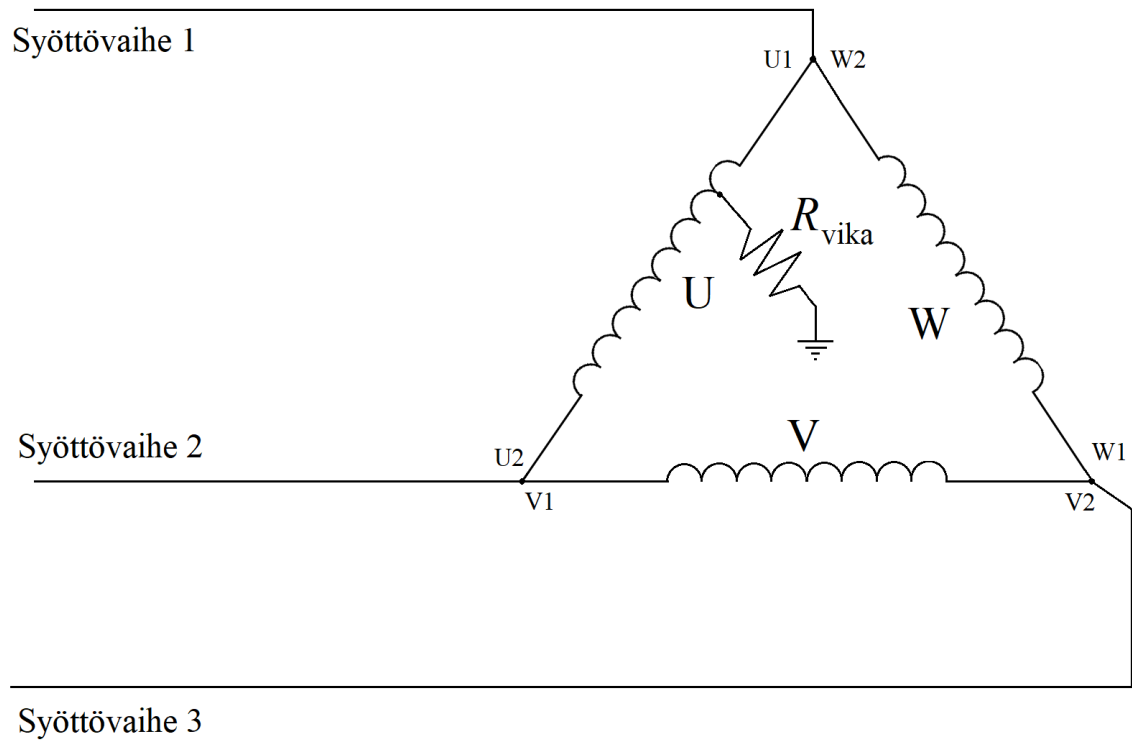


Kuva 2.8. Staattorikäämin eri käämikierroksien välille on syntynyt oikosulku, eli kierrossulku, vikavastuksen R_{vika} kautta.

Kuten kuvassa 2.8 on esitetty, on kierrossulussa vain osa käämikierroksista oikosulussa toisiinsa. Tämän vian toteuttaminen keinotekoisesti vaatii muutoksien tekemistä moottorin staattoriin.

2.3.4 Staattorikäämin maasulku

Staattorikäämin maasulussa kuvan 2.9 kytkennän osoittamalla tavalla, virtaa pääsee suoraan tai jonkin vikaresistanssin kautta karkaamaan maapotentiaaliin, jolloin vähemmän virtaa menee staattorikäämin läpi ja epätasapaino vaiheiden välillä kasvaa. Vika voi syntyä esimerkiksi eristeaurion seurauksena, jos jokin vaiheeseen kytketty osa pääsee kytkeytymään galvanisesti staattorin maadoitettuun runkoon.

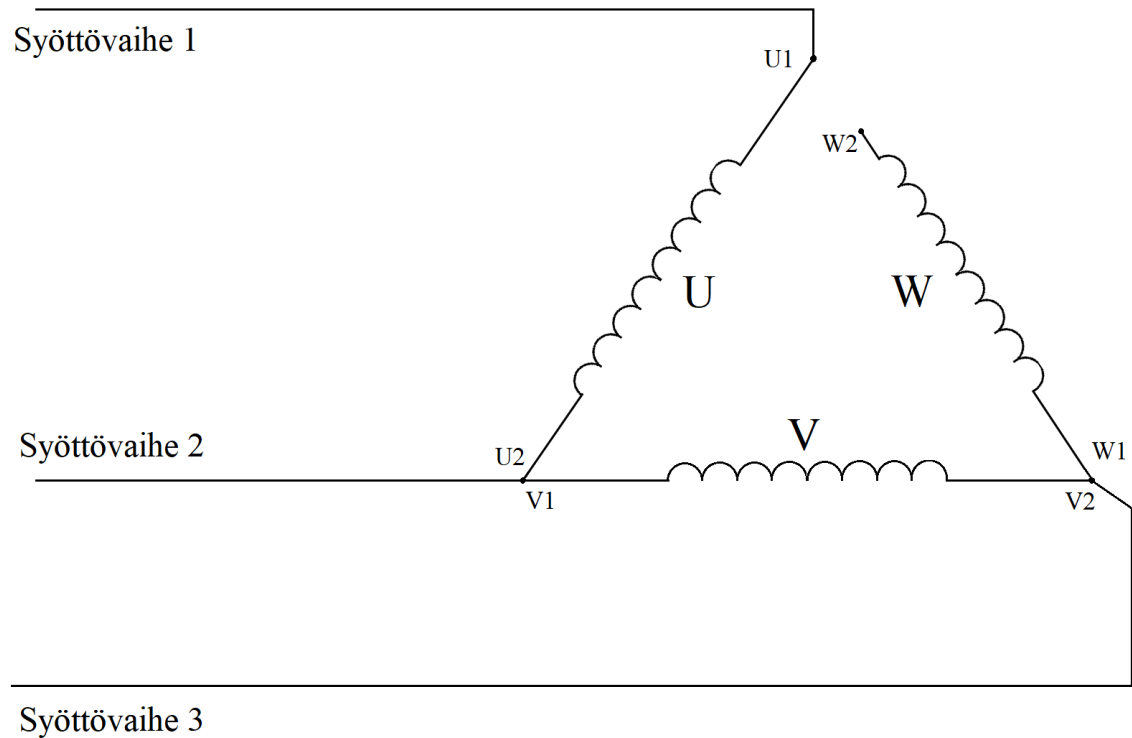


Kuva 2.9. Oikosulku staattorikäänistä maapotentiaaliin, eli maasulku, vikavastuksen R_{vika} kautta.

Staattorikäänien maasulut nostavat virran symmetrisien komponenttien nollakomponentin arvoa (Das 2017). Tämän vuoksi staattorikäänien maasulun voi havaita nollakomponentin avulla. Taajuusmuuttajakäytössä modernien taajuusmuuttajien pitäisi havaita tilanne, jos virtaa pääsee karkaamaan maapotentiaaliin, ja varoittaa laitteiston käyttäjää.

2.3.5 Staattorin virtapiirin avautuminen

Yhden vaihejohtimen irrotessa, katketessa kokonaan tai staattorikäänien vikaantuessa kuvan 2.10 mukaisesti, viallisen staattorikäänien osa virtapiiristä avautuu, eikä virtaa enää kulje sen läpi. Tässä tapauksessa muiden syöttövaiheiden vaihevirrät ja epätasapaino vaihteiden välillä kasvavat huomattavasti. Moottori myös ylikuumenee, mikäli se on jo käynnissä vian ilmestyessä, sillä kunnossa olevissa vaiheissa kulkee normaalia isompi virta.



Kuva 2.10. Yhden staattorikäänin piiri on kokonaan avoin. Tällöin W2 ja W1 -napojen välillä ei kulje lainkaan virtaa.

Näitä vikoja voi olla myös erittäin hankala havaita, jos ne ovat pieniä. Myös niiden erottaminen toisistaan purkamatta moottoria on haasteellista. Moottorin käyttöä jatkettaessa pienillä vioilla on kuitenkin suuri todennäköisyys muuttua ajan kanssa suuremmiksi vioiksi. (Faiz et al. 2017.)

2.3.6 Roottorin sähköiset viat

Roottorin sähköisiä vikoja ovat muun muassa roottorisauvan rikkoutuminen esimerkiksi katkeamalla tai halkeilemalla ja päätyrenkaiden, eli oikosulkurenkaiden, murtumat (Joksimović et al. 2013). Roottoriin liittyvien vikojen esiintyvyys on kuvan 2.6 mukaan noin 5 % oikosulkumoottorien vioista (Ferreira et al. 2016).

Roottorisauvat voivat murtua tai katketa kokonaan. Tämä voi johtua valmistusprosessissa tapahtuneesta virheestä, mikä onkin yleisin syy roottorisauvavaurioille. Roottorisauvaviat ovat vakavia, koska roottorisauvavikaisen moottorin käyttämistä jatkettaessa vian muuttuminen vakavammaksi on hyvin todennäköistä, sillä vikaantuneen roottorisauvan

vastakkainen roottorisauva joutuu kantamaan enemmän lämpökuormaa kuin roottorisauvojen ollessa kunnossa, mikä lyhentää sen käyttöikää (Asad et al. 2019). Roottoria, jonka roottorisauvat on valmistettu valamalla, ei ole yleensä mahdollista korjata. Yleensä roottori tai koko moottori korvataan tarvittaessa uudella. (Karmakar et al. 2016.)

Roottorisauvan viat aiheuttavat staattorivirtaan päätaajuuden sivukaistoja. Näiden sivukaistojen taajuudet voidaan laskea yhtälöllä

$$f_{brb} = f_{stt}(1 \pm 2ks), \quad (2.6)$$

jossa f_{brb} on taajuus, jolle sivukaistoja muodostuu roottorisauvojen murtuessa tai katketessa, f_{stt} on syöttötaajuus, k on jokin positiivinen kokonaisluku [1, 2, 3, ...] ja s on moottorin suhteellinen jättämä (Karmakar et al. 2016). Vika voi aiheuttaa sivukaistoja myös taajuuksille, jotka voidaan laskea yhtälöllä

$$f_{brb} = f_{stt} \left[\left(\frac{k}{p} \right) (1 - s) \pm s \right], \quad (2.7)$$

jossa p on moottorin napapariluku (Asad et al. 2019). Vika alkaa muodostaa sivukaistoja jo melko varhaisessa vaiheessa (Miletic & Cettolo 2003).

2.3.7 Roottorin ja laakerien mekaaniset viat

Roottorin mekaanisia vikoja ovat mm. laakeriviat, roottorin epäkeskisyyys, vääntynyt akseli sekä virheet moottorin linjauksessa (Joksimović et al. 2013). Oikosulkumoottoreissa käytetyistä laakereista suurin osa on vierintälaakereita, kuten kuulalaakereita, vaikkakin suurissa moottoreissa voidaan käyttää myös öljyvoideltuja liukulaakereita (Lindh 2003).

Laakeriviat ilmenevät yleensä värähtelytaajuuksista, ja huomattavat viat voi tunnistaa jopa aistinvaraisesti moottorin käyntiäänestä. Kuten kuvasta 2.6 voidaan nähdä, lähes 40 % oikosulkumoottorien vioista aiheutuu laakereista (Ferreira et al. 2016). Laakereihin voi tulla erilaisia vikoja, kuten laakerimateriaalin hilseily, urautuminen, halkeilu, ruostuminen ja yleinen kuluminen. (Lindh 2003.)

Laakerivikojen aiheuttamien värähtelytaajuuksien avulla voidaan tunnistaa, onko laakeri todennäköisesti vaurioitunut vai ei. Rullalaakereissa, joissa on jokin vika, aiheutuu pyörivän osan osuessa vialliseen kohtaan impulssi, joka näkyy mekaanisena värähdyksenä. Kun laakeri pyörii, niin näitä värähdyksiä tulee jatkuvasti. Tällöin voidaan määrittää eri vioille laakerin toistotaajuus, joka on impulssien välillä kuluneen ajan käänteisluku, kun jätetään

huomiotta vierintäelimien kyky liukua pyörimisen sijaan. Laakerin ulkokehällä oleville viakohteille tämä värähtelyn toistotaajuus voidaan laskea yhtälöllä

$$f_{\text{vib,bor}} = \frac{N_{\text{bb}}}{2} f_r \left(1 - \frac{d_{\text{bb}}}{d_{\text{bp}}} \cos \alpha\right), \quad (2.8)$$

jossa $f_{\text{vib,bor}}$ on toistotaajuus, f_r on roottorin pyörimisnopeus kierroksina sekunnissa, N_{bb} on vierintäelimien määrä laakerissa, d_{bb} on vierintäelimien halkaisija, d_{bp} on vierintäelimen kulku-uran halkaisija laakerin keskiön yli ja α on kosketuskulma. Kosketuskulma on laakerin akseliin nähden kohtisuorassa olevan tason, ja laakerin vierintäelimien tukipisteiden kautta kulkevan janan välinen kulma (SKF 2023). Sisemmän kehän vikojen tapauksessa toistotaajuus taas lasketaan yhtälöllä

$$f_{\text{vib,bir}} = \frac{N_{\text{bb}}}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{\text{bb}}}{d_{\text{bp}}} \cos \alpha\right), \quad (2.9)$$

jossa $f_{\text{vib,bir}}$ on laakerin sisäkehän vikojen toistotaajuus. Laakerin vierintäelimien vikojen toistotaajuus puolestaan lasketaan yhtälöllä

$$f_{\text{vib,bs}} = \frac{d_{\text{bp}}}{2d_{\text{bb}}} f_r \left(1 - \left(\frac{d_{\text{bb}}}{d_{\text{bp}}}\right)^2 \cos^2 \alpha\right), \quad (2.10)$$

jossa $f_{\text{vib,bs}}$ on laakerin vierintäelimien vikojen toistotaajuus. Laakerin kuulien separaattoriin vikojen toistotaajuus puolestaan lasketaan yhtälöllä

$$f_{\text{vib,bc}} = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{\text{bb}}}{d_{\text{bp}}} \cos \alpha\right), \quad (2.11)$$

jossa $f_{\text{vib,bc}}$ on laakerin kuulien separaattoriin vikojen toistotaajuus. (Lindh 2003.)

Laakerin ulko- ja sisäkehän vikoja voidaan havaita myös syöttövirran yliaaltokomponenttien avulla. Taajuudet eivät kuitenkaan ole samat kuin värähtelyn toistotaajuudet. Laakerin ulkokehällä oleville vioille tämä syöttövirran toistotaajuus voidaan laskea yhtälöllä

$$f_{\text{bor}} = f_{\text{stt}} + k \frac{N_{\text{bb}}}{2} f_r \left(1 - \frac{d_{\text{bb}}}{d_{\text{bp}}} \cos \alpha\right), \quad (2.12)$$

jossa f_{bor} on syöttövirrassa esiintyvän ulkokehän vian aiheuttaman komponentin toistotaajuus ja k on nollasta poikkeava kokonaisluku. Sisemmän kehän vikojen tapauksessa toistotaajuus taas lasketaan yhtälöllä

$$f_{\text{bir}} = f_{\text{stt}} + k \frac{N_{\text{bb}}}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{\text{bb}}}{d_{\text{bp}}} \cos \alpha\right), \quad (2.13)$$

jossa f_{bir} on syöttövirrassa esiintyvän sisäkehän vian aiheuttaman komponentin toistotaajuus. (Lindh & Partanen 1999.)

Oikosulkumoottorin roottori voi joskus olla epäkeskinen. Epäkeskisyys saa aikaan sen, että moottorin ilmavälin pituus vaihtelee, mikä aiheuttaa vaihteluita pyörimisnopeudessa (Faiz et al. 2017). Roottorin epäkeskisyys voi olla joko staattista epäkeskisyyttä, jolloin roottorin ja akselin muodostama kokonaisuus on staattoriin nähden epäkeskinen, eli akselin pää ei ole täysin sille tarkoitettussa paikassa, mikä voi johtua esimerkiksi suureksi päässeestä laakeri-viasta. Roottorin epäkeskisyys voi olla myös dynaamista, jolloin akseli itsessään on oikeassa paikassa, mutta roottori ei ole tasaisesti keskittynyt akselin ympärille, vaan sen ulkokehän eri pisteet ovat eri etäisyydellä akselin keskipisteestä. (Lindh 2003.)

Roottorin epäkeskisyys on vika, joka voi pahentua moottoria käytettäessä ja jopa aiheuttaa roottorisauvan vaurioitumisen tai akselin vääntymisen. Vika voidaan kuitenkin yrittää havaita, sillä sen on todettu aiheuttavan staattorivirtaan sivukaistoja korkeille taajuuksille, jotka ovat alla olevan yhtälön mukaisia:

$$f_{ecc} = f_{stt} \left[\frac{(kQ_r \pm n_d)(1-s)}{p} \pm v \right], \quad (2.14)$$

jossa f_{ecc} on taajuus, jolle sivukaistat sijoittuvat, k on kokonaisluku, Q_r on roottorisauvojen määrä, n_d on 0, jos kyse on staattisesta epäkeskisyudesta ja suurempi kokonaisluku jos kyse on dynaamisesta epäkeskisyudesta, v on syöttövirran harmonisien kertaluku, eli $[1, 3, 5, \dots]$. Poikkeuksen tekee tapaus $k = 1$, $n_d = 0$ ja $v = 1$, sillä näillä parametreilla saatavat taajuudet ovat sellaisia, jotka esiintyvät ehjässäkin oikosulkumoottorissa sen rakenteen vuoksi. (Faiz et al. 2017.)

Vääntynyt akseli aiheuttaa roottorin massaepätasapainoa ja moottorin ilmavälin vaihtelua (Karmakar et al. 2016). Vääntynyt akseli on käytännössä dynaamisesti epäkeskinen. Tämä voi johtaa vakavan vian tapauksessa siihen, että roottori osuu staattoriin moottorin pyöriessä. Massaepätasapainon oireita käsitellään myöhemmässä kappaleessa.

Kun moottori kiinnitetään generaattoriin, pumppuun tai vastaavaan laitteeseen, niin käyttö-akselien välissä käytetään monesti kolmesta komponentista koostuvaa hammasliitintä, tai muuta vastaavaa liitintä. Moottori ja siihen liitettävä toinen laite pitäisi kiinnitettäessä linjata, eli kiinnittää kumpikin komponentti niin tarkasti, että ne ovat akseliinsa nähden samalla korkeudella, eikä sivusuuntaisiakaan vinoumia esiinny. Jos linjaus on virheellinen, niin moottorin laakerit ja akseli rasittuvat, mikä voi johtaa kulumiseen ja käyttöiän lyhenemiseen (SKF 2017).

Linjauksvirheitä on kahta eri tyyppiä, kulmavirhettä ja yhdensuuntaisuusvirhettä. Näistä ensin mainittua muodostuu, kun laitteiden akselien keskikohdat eivät ole linjassaan siten, että toinen akseli on pienessä kulmassa toiseen nähden, vaikka niiden keskilinjat kohtaisivatkin liitäntäpisteessä. Toista muodostuu, kun akselien keskikohdat eivät ole samalla tasolla toistensa kanssa, esimerkiksi jos toinen akseli olisi 0,1 mm alempana kuin toinen. Näitä vikoja voi esiintyä myös yhtä aikaa. (Baccarini et al. 2011.)

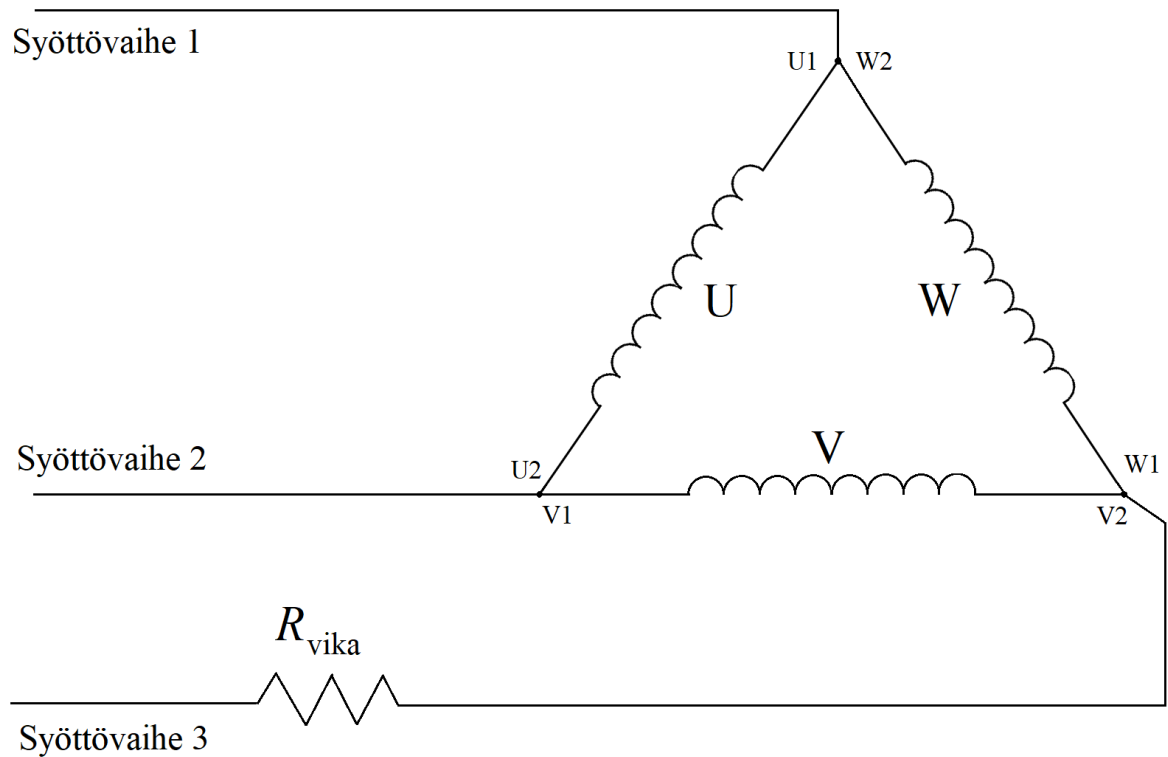
2.3.8 Tehoelektroniikkakomponenttien rikkoutuminen

Oikosulkumoottoria syöttävän taajuusmuuttajan tehoelektroniikkakomponentitkin voivat vikaantua, esimerkiksi liian suuren syöttöjännitteen vuoksi. Puolijohdekomponentit, joita käytetään kytkiminä taajuusmuuttajassa, voivat vikaantua käyttökelvottomiksi (Lezana et al. 2010). Tällöin taajuusmuuttaja ei toimi oikein tai lainkaan. Tehoelektroniikkakomponenttien vikojen tunnistamista ja kunnonvalvontaa ei kuitenkaan käsitellä tässä työssä, sillä ne eivät ole suoranaisesti oikosulkumoottorien osia.

2.3.9 Muut viat

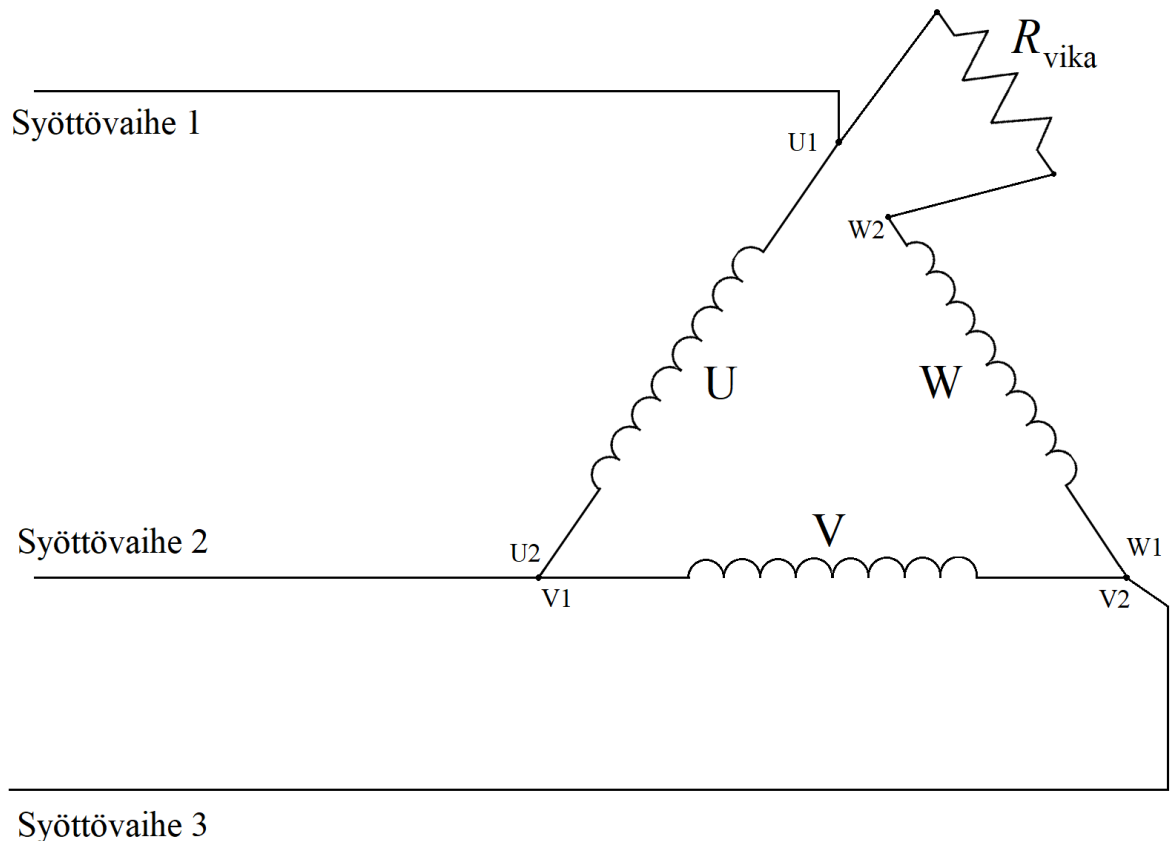
Muita vikoja voivat olla esimerkiksi syöttöviat, moottorin kiinnityksen pettäminen, roottorin massaepätasapaino sekä ryömintä. Näitä vikoja käsitellään tässä kappaleessa.

Syöttövikoja ovat mm. epäsymmetrinen syöttö vaiheiden välillä, mikä näkyy eri suuruisina vaihevirtoina. Tämä voi johtua esimerkiksi hapettuneista tai huomattavasti eri pituisista tai paksuisista syöttökaapeleista. Syöttövikaa vastaava kytkentä on esitetty kuvassa 2.11. Taajuusmuuttaja pyrkii kompensoimaan vikaa, joten se tulee useammin esiin verkkosyötetyissä moottoreissa. Vika johtaa ylimääräiseen lämpenemään, sekä tarpeeksi suuren vian tapauksessa ylimääräiseen tärinään. Vika voi näyttäytyä virtapiirissä resistanssina yhdessä tai useammassa johtimessa. Epäsymmetrinen syöttö myös nostaa virran vastakomponentin arvoa (Lindh & Partanen 1999).



Kuva 2.11. Epäsymmetrinen syöttövika, joka useimmiten johtuu syöttöjohtimien hapettumisesta tai niiden keskinäisistä eroista.

Epätasapainoa voi myös esiintyä staattorikämmien ja syöttöjohtimien liitäntöjen välillä esimerkiksi liitäntöjen hapettumisen vuoksi. Tässä työssä vikaa kutsutaan moottorin epäsymmetriaviaksi. Tätä vikaa vastaava kytkentä on esitetty kuvassa 2.12.



Kuva 2.12. Moottorissa on epäsymmetriavika, eli epätasapainoa syöttöjohtimien liitosten ja staattorikäämien välissä. Tämä voi johtua esimerkiksi liittimien tai johtimien hapettumisesta.

On myös mahdollista kytkeä kaksi vaihejohdinta keskenään väärin päin. Tällöin moottori pyrkii pyörimään vastakkaiseen pyörimissuuntaan kuin pitäisi.

Roottorin massaepätasapaino on tila, jossa roottorin massajakauma ei ole täysin tasainen ja painopiste ei ole akselin keskellä. Tämä johtuu usein valmistusvirheestä. Jos epätasapaino on tarpeeksi iso, roottori voi kulua mekaanisesti osuessaan staattoriin. Massaepätasapaino voi myös aiheuttaa ajan kanssa muita vikoja. Pienen massaepätasapainovian havainnointi ilman erityistä siihen tarkoitettua laitteistoa voi olla hankalaa, mutta tarpeeksi suuren roottorin massaepätasapainon aiheuttamien staattorivirran harmonisien komponenttien taajuudet voidaan laskea yhtälöllä

$$f_{ubm} = f_{stt} \left[\frac{k(1-s)}{p} + 1 \right], \quad (2.15)$$

jossa f_{ubm} on taajuus, jolle harmonisia muodostuu, k on jokin kokonaisluku ja p on moottorin napaparien lukumäärä. (Karmakar et al. 2016; Rahman & Uddin 2017.)

Moottorin kiinnitys voi pettää eri tavoin. Käytännössä tämä voi tarkoittaa esimerkiksi moottorin jalkojen kiinnityspulttien löystymistä tai kiinnitysalustan, kuten esimerkiksi betonilaa-tan, hajoamista. Tästä seuraa mm. moottorin ylimääräistä värinää, kun moottori pääsee liik-kumaan kiinnitysalustaan nähden (Karmakar et al. 2016).

2.4 Menetelmiä vikojen tunnistukseen

Perinteisesti iso osa moottorien kunnonvalvontaa on ollut moottorin huoltaminen etukäteen vikojen ehkäisemiseksi esimerkiksi tiettyä huolto-ohjelmaa noudattaen sekä huoltotaukojen aikaiset mittaukset ja aistinvaraiset havainnot moottorista (Omron Corporation 2021). Tä-män päivän kunnonvalvonta moottoreihin liitettävien laitteiden avulla on luonteeltaan tren-diseurantaa, eli eri indikaattoreita seurataan reaaliajassa ja mahdollisista ajan mittaan tapah-tuvista muutoksista vedetään johtopäätöksiä (Omron Corporation 2021). Esimerkiksi moot-torin syöttövirran tiettyjen yliaaltotaajuuksien amplitudien kasvaminen voi indikoida kehit-tyvää roottorisauvavikaa. Tämän vuoksi on tärkeää, että vikoja voidaan tunnistaa toisistaan eri indikaattoreita seuraamalla.

Vikojen tunnistamiseen on vuosien varrella kehitetty erilaisia menetelmiä. Todennäköisesti eniten käytetty menetelmä on moottoriin syötettävien virtojen mittaaminen, mittausdatan käsittely ja muuntaminen taajuustasoon Fourier-muunnosta hyödyntäen ja analysointi taa-juustasossa (Miletic & Cettolo 2003). Tätä menetelmää kuitenkin hankaloittaa se, jos käy-tössä on taajuusmuuttaja, sillä se aiheuttaa lisää staattorivirtoihin harmonisia komponentteja. Näitä komponentteja voi helposti sotkea jonkin vian aiheuttamiin komponentteihin ja täten aiheuttaa väärän hälytyksen viasta (Miletic & Cettolo 2003).

Moottorin syöttövirtoja voidaan analysoida muillakin tavoilla, kuin taajuusanalyysillä. Esi-merkiksi syöttövirtojen muuntaminen symmetrisiksi komponenteikseen voi auttaa tunnistaa moottorin epäsymmetrisen syötön tai tiettyjä staattorivikoja (Lindh 2003).

Muita tapoja havaita vikoja ovat mm. värinän havaitseminen mittaamalla kiihtyvyyttä ja mit-tausdataa analysoimalla, lämpötilan mittaaminen moottorin eri osista ja näin saatujen läm-pötilatietojen avulla lämpökartan piirtämällä ja kemiallisin menetelmin analysoimalla kaa-suja ja partikkeleita, joita moottorin ilmanvaihtoaukoista poistuu. Joitakin vikoja voi havaita

myös moottorin pyörintänopeuksien muutoksista, sekä muutoin aistinvaraisesti havaitsemalla. (Lindh 2003.)

Tärinän perusteella vikoja havaittaessa täytyy huomioida myös moottorin resonanssitaajuus. Usein vikojen havainnoinnissa käytetään apuna verhoikäyräspektriä, sillä moottorin normaali värähtelyt ovat usein amplitudiltaan paljon suurempia, kuin etsittävät vikojen aiheuttamien värähtelyjen amplitudit, jolloin ne voi olla todella hankalia löytää. (Lindh 2003.)

Verhoikäyräspektri muodostetaan suodattamalla mittausdataa kaistanpäästösuodattimen avulla. Verhoikäyräspektriä käytetään, koska se helpottaa moottorin laakerivikojen aiheuttamien toistotaajuuksien havaitsemista ja erottelua moottorille ominaisesta värähtelystä. (Lindh 2003.)

2.4.1 Virran mittaaminen

Tehoanalysointitoiminnan kannalta virran mittaaminen on välttämätöntä. Virta-antureita on olemassa erilaisia ja niiden väliltä valinta riippuu käyttökohteesta. Taulukossa 2.2 on esitetty muutamia eri anturityyppejä, joita virran mittaamiseen voidaan käyttää, sekä niiden ominaisuuksia, kuten toiminnan perusteet, hyvät ja huonot puolet sekä suurin piirteiset virranmittausalueet (Silventoinen & Kuisma 1999).

Taulukko 2.2. Eri virtamittauksen menetelmiä, niiden etuja ja huonoja puolia (Silventoinen & Kuisma 1999).

Mittaustermi	Toiminta	Hyvät puolet	Huonot puolet	Virranmittausalue
Sivuvastus	Virta kulkee sivuvastuksen, jonka resistanssi tunnetaan, läpi ja jännite vastuksen yli mitataan. Virta voidaan laskea Ohmin lain avulla.	Yksinkertainen ja halpa ratkaisu.	Menetelmän tarkkuus on huono ja vastuksen lämpötila vaikuttaa tuloksiin. Suurilla taajuuksilla resistanssi kasvaa.	-
Virtamuuntajat	Johtimessa kulkeva virta saadaan induktion avulla	Voidaan käyttää myös suurien virtojen mittauksessa,	Voidaan käyttää vain vaihtovirran mittaukseen.	Saatavilla on laitteita ainakin 5 kA

	indusoimaan muuntajan toisiopiiriin virran, joka on verrannollinen johtimen virtaan.	mitattava piiri on galvaanisesti erotettu mittalaitteesta.		(vaihtovirta, huippuarvo) suuruusluokkaan asti.
Hall-anturiin perustuvat menetelmät	Johtimessa kulkeva virta muodostaa ympärilleen magneettikentän. Magneettivuon tiheyden mittaamalla, voidaan johtimessa kulkeva virta laskea.	Suuri tarkkuus ja suuri taajuuskaista. Voi mitata myös tasavirtaa.	Sopii lähinnä teollisuuden käyttöön.	Muutamista ampeereista jopa kymmeneen kiloampeereihin.
Magneettikenttäanturit	Virta voidaan approksimoida laskeamalla, kun anturia käytetään mittaamaan magneettikentän voimakkuus johtimen läheltä erilaisilla anturityypeillä.	Galvaaninen erotus mitattavasta piiristä, yleensä pieniä ja yksinkertaisia mittalaitteita, suuri taajuuskaista.	Interferenssi-ilmiöt, lämpötilan vaikutukset mitaustuloksiin, häiriöt epäsuorasta mittaustavasta sekä ulkoisista magneettikentistä johtuen.	Muutamista ampeereista jopa kymmeneen kiloampeereihin.

Yllä olevan taulukon 2.2 virtamuuntajien luokkaan menevät myös Rogowski-kelat. Tämä anturityyppi on laajalti käytetty virran mittauksessa, ja Rogowski-kela tarjoaakin laajan mittausalueen. Rogowski-kelojen mittausepävarmuus on monessa tapauksessa prosentin luokkaa. (Silventoinen & Kuisma 1999.)

2.4.2 Jännitteen ja virran tehollisarvot

Sähköisien jaksottaisien suureiden tapauksessa, kuten esimerkiksi jännitteen tai virran, tehollisarvolla tarkoitetaan yhden jakson aikana sellaista arvoa, jolla tasavirtapiirissä vastuksen yli syntyisi yhtä suuri tehohäviö, kuin mitä pätöteho on. Tehollisarvo jatkuvassa jaksottaisessa signaalissa voidaan laskea yhtälöllä

$$x_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t) dt}, \quad (2.16)$$

jossa $x(t)$ on jatkuvan jaksottaisen signaalin arvo ajan t funktiona, kuten jännite- tai virtasignaali, x_{RMS} on signaalin yhden jakson tehollisarvo, t_0 on jakson aloitusaika, T on jaksonaika. Vastaavasti diskreetin signaalin tapauksessa käytetään yhtälöä

$$X_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n_0}^{n_0+N-1} X^2(n)}, \quad (2.17)$$

jossa $X(n)$ diskreetin jaksottaisen signaalin arvo, X_{RMS} on diskreetin signaalin yhden jakson tehollisarvo, n on kokonaisluku, joka merkitsee n :ttä datapistettä, n_0 on se datapiste, josta jakso alkaa, N on jakson datapisteiden määrä. (Ferrero et al. 2015.)

2.4.3 Virran symmetriset komponentit

Jos kolmivaihejärjestelmä on epäsymmetrinen, kuten se staattorivikaisessa moottorissa usein on, sen analysointi on hankalampaa kuin symmetrisen kolmivaihejärjestelmän. Epäsymmetrinen kolmivaihejärjestelmä voidaan esittää symmetrisiä komponentteja hyödyntämällä. Epäsymmetrisen kolmivaihejärjestelyn esitykseen tarvitaan kolme symmetristä kolmivaihejärjestelmää, jotka keskenään summaamalla saadaan epäsymmetrinen kolmivaihejärjestelmä. Nämä kolme järjestelmää ovat myötä-, vasta- ja nollajärjestelmä, joista nollajärjestelmässä kaikki kolme vaihetta ovat samansuuntaisia ja yhtä suuria. Jos kolmivaihejärjestelmä olisi täysin symmetrinen, se sisältäisi vain myötäjärjestelmän komponentteja, eikä muita olisi lainkaan. (Das 2017.)

Epäsymmetrinen kolmivaihejärjestelmä voidaan muuntaa symmetrisiksi komponenteikseen yhtälöryhmällä

$$\begin{cases} X_0 = \frac{1}{3}(X_A + X_B + X_C) \\ X_1 = \frac{1}{3}(X_A + aX_B + a^2X_C), \\ X_2 = \frac{1}{3}(X_A + a^2X_B + aX_C) \end{cases} \quad (2.18)$$

jossa X esittää diskreettiä signaalia, tässä tapauksessa joko jännitettä tai virtaa, X_0 on nollajärjestelmä, X_1 on myötäjärjestelmä, X_2 on vastajärjestelmä, X_A on vaihe 1, X_B on vaihe 2, X_C on vaihe 3 ja a on vaiheenkäntöoperaattori, joka kääntää vaihetta 120° vastapäivään. Vaiheenkäntöoperaattorin arvo on laskettavissa yhtälöllä

$$a = e^{i\frac{2\pi}{3}}, \quad (2.19)$$

jossa e on Neperin luku ja i imaginääriyksikkö. Epäsymmetrinen kolmivaihejärjestelmä saadaan muodostettua uudelleen yhtälöryhmällä

$$\begin{cases} X_A = X_0 + X_1 + X_2 \\ X_B = X_0 + a^2X_1 + aX_2. \\ X_C = X_0 + aX_1 + a^2X_2 \end{cases} \quad (2.20)$$

Yhtälöryhmät voidaan myös esittää matriisimuodossaan. (Das 2017.)

2.4.4 Fourier-muunnos ja nopea Fourier-muunnos

Fourier-muunnoksen avulla aikatason signaali saadaan muunnettua taajuustasoon (Karmakar et al. 2016). Digitaalisissa järjestelmissä signaalit esiintyvät diskreetteinä, eli ne eivät ole aikajatkuvia. Diskreetin signaalin tapauksessa, eli esimerkiksi tietokoneella Fourier-muunnosta tehdessä, käytetäänkin diskreettiä Fourier-muunnosta (DFT) signaalin muuntamiseen (Asad et al. 2019). Jotta Fourier-muunnosta voidaan käyttää signaalin analysoimiseen, täytyy näytteistystaajuuden, eli kahden peräkkäisen näytteenottoajan välisen ajan käänteisarvon, olla suurempi, kuin mitä kaksinkertainen analysoitavan signaalin suurimman taajuuskomponentin taajuus on (Karmakar et al. 2016). Taajuustasosta signaali voidaan myös muuntaa takaisin aikatasoon käänteisen Fourier-muunnoksen avulla (Karmakar et al. 2016). DFT voidaan laskea yhtälöllä

$$Y(k) = \sum_{j=0}^{N-1} x(j)e^{(-2\pi i k j / N)}, \quad (2.21)$$

jossa y on taajuustasoon muunnettu signaali, x on alkuperäinen aikatason signaali, k ja j ovat positiivisia kokonaislukuja, jotka toimivat indeksilukuina ja jotka saavat suurimmillaan arvon $N-1$, N on alkuperäisen signaalin mittauspisteiden kokonaismäärä ja i on imaginaariyksikkö (Takahashi 2019). Käänteinen DFT voidaan laskea yhtälöllä

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} Y(k)e^{(-2\pi i k j / N)}, \quad (2.22)$$

jossa x on aikatasoon palautettu signaali ja y taajuustason muunnettu signaali (Takahashi 2019).

Lähes jokainen vika aiheuttaa jossain määrin muutoksia staattorivirtojen taajuusspektriin. Nämä muutokset ovat usein eri vioille ominaisia, joten taajuusanalyysia käytetään laajasti erilaisissa kunnonvalvonnan sovelluksissa vian tunnistukseen. (Asad et al. 2019.)

Nopea Fourier-Muunnos (FFT) on käytännössä algoritmi, joka suorittaa DFT:n merkittävästi nopeammin ja pienemmällä laskentateholla aikatasosta taajuustasoon ja sitä käytetäänkin laajasti eri tieteenaloilla. FFT-algoritmien toiminta perustuu aritmeettisten laskutoimitusten määrän huomattavaan vähentämiseen verrattuna siihen, kuinka paljon laskutoimituksia olisi puhtaasti DFT:n määritteleviä yhtälöitä (yhtälöt 2.21 ja 2.22) käyttäessä (Takahashi 2019). FFT-algoritmeja käyttäen voidaan laskutoimitusten määrää vähentää huomattavasti, jos datan määrä on suuri, eli karkeasti sanottuna jos datapisteitä on 1000 kappaletta tai enemmän. (Karmakar et al. 2016.)

2.4.5 Tehoanalyysointilaitteet

Tehoanalyysointilaitteet ovat laitteita, jotka mittaavat ja analysoivat sähköisiä suureita, kuten jännitettä ja sähkövirtaa yksi- tai kolmivaihejärjestelmissä. Mittausdatan perusteella laitteet voivat laskea myös käytettävän laitteen kuluttamaa näennäis-, pätö- ja loistehoa sekä esimerkiksi tehokertoimia ja sähkövirran tehollisarvoja. Lisäksi jotkin tehoanalyysointilaitteet laskevat, vaihe-eroja ja vaikkapa hyötysuhteita. Tehoanalyysointilaitteet voivat sisältää myös mittausdatan analysointia helpottavia ominaisuuksia, kuten vaikkapa symmetrisien komponenttien laskenta ja esitys. (HBM 2022.)

Tehoanalyysointilaitteet digitalisoivat, eli diskretoivat, mitatun analogisen signaalin ottamalla siitä näytteitä niin tiheällä aikavälillä, että se mahdollistaa tehoanalyysointilaitteen sisältämälle mikroprosessorille numeerisen analyysin (Elspec LTD, 2022). Jotta signaali saataisiin mitattua tarkasti, mittalaitteen taajuuskaistan tulisi olla viisinkertainen signaalin korkeimpaan taajuuskomponenttiin nähden (Ferrero et al. 2015).

2.5 Kaupalliset kunnonvalvontasovellukset

Tällä hetkellä markkinoilla on jo olemassa sähkömoottorien kunnonvalvontaan tarkoitettuja laitteita. Laitteet pyrkivät löytämään vikoja mahdollisimman nopeasti niiden realisoituessa, tai jopa ennustamaan vian ilmaantumisen, esimerkiksi laakerivian ajan myötä kasvavasta värinän määrästä tietyllä taajuudella. Valmiita laitteistoja on tarjolla mm. Omronin K6CM-sarja, Iris Powerin GuardII+ sekä Schaefflerin OPTIME.

Edellä mainituissa järjestelmissä on keskenään eroavaisuuksia. OPTIME-laitteiston toiminta perustuu moottorin värinöiden mittaukseen ja analysointiin (Schaeffler Technologies AG &

Co. KG 2022), kun taas Omron tarjoaa erillisiä laitteita, jotka havaitsevat kehittyviä vikoja syöttövirran (K6CM-CI), värinän (K6CM-VB) ja eristysresistanssin (K6CM-IS) mittausten ja analysoinnin avulla, ja jotka kaikki voidaan asentaa samanaikaisesti yhteen moottoriin (Omron Corporation 2020). Sekä Schaefflerin että Omronin mainitut laitteet ovat moottoriin asennettavia ja ne toimivat moottorin ollessa käytössä. Myös Iris Powerilta on saatavissa syöttövirtaa (MDSP3) ja värinää (CoDis) analysoivat laitteet, sekä laitteita, joilla pystytään arvioimaan moottorin kuntoa huoltopysäytyksen aikana (Iris Power 2021).

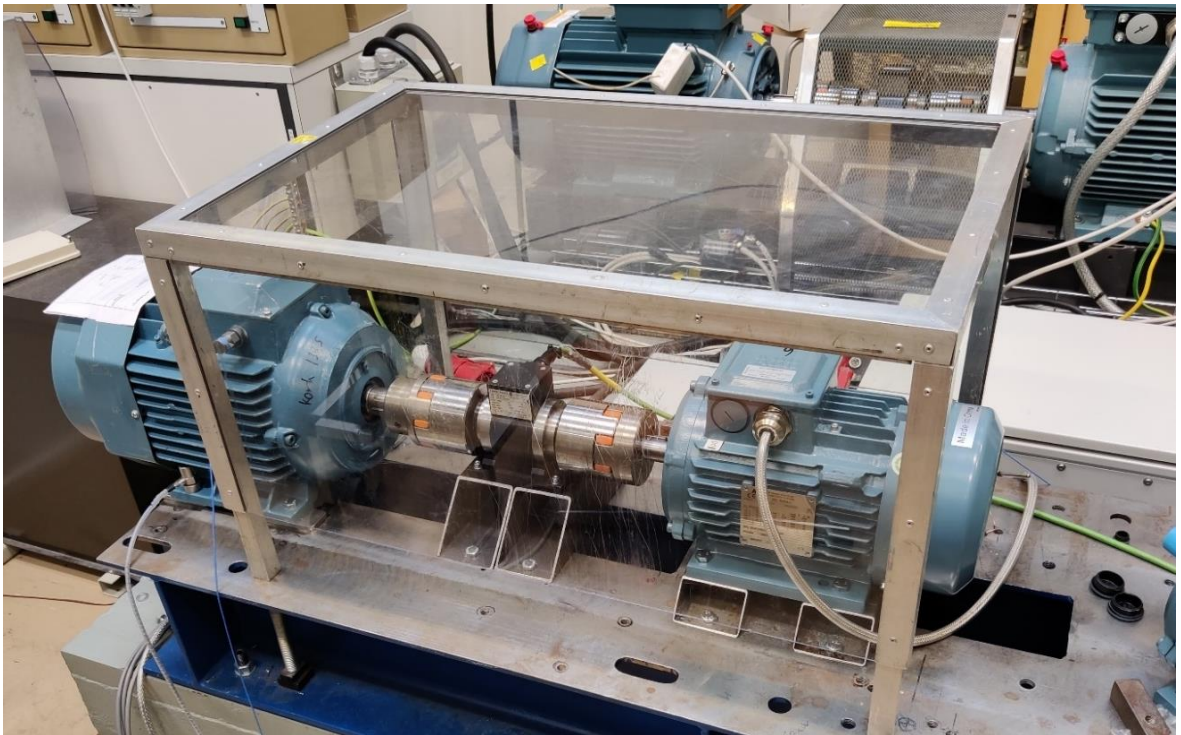
Schaefflerin laitteiston toiminta perustuu värinän ja lämpötilan mittaamiseen yhdestä tai useammasta kohtaa moottoria langattomasti keskusyksikköön yhdistettyjen antureiden avulla ja datan lähettämisestä internet-yhteyden avulla pilvipalveluun, jossa mittausdatan varsinainen analysointi tapahtuu. Schaefflerin palvelun kerrotaan olevan tarkoitettu moottoreille, joiden pyörimisnopeus on välillä 120 1/min ... 5000 1/min. Antureiden värähtelyn taajuuskaistat ovat 2 Hz ... 3 kHz (OPTIME-3) ja 2 Hz ... 5 kHz (OPTIME-5). (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2022.)

Omronin K6CM-sarja sisältää erilaisia laitteita, jotka mittaavat eri asioita moottoreista. Esimerkiksi eristeiden kuntoa valvotaan mittaamalla eristysresistanssia, joka pienenee eristeiden kunnan huonontuessa. Värinämittauksien perusteella taas valvotaan esimerkiksi laakerien kuntoa. K6CM-VB:en anturit havaitsevat värinää taajuusväliltä 10 Hz ... 10 kHz. (Omron Corporation 2020.)

Iris Powerin laitemallistosta löytyy hieman erilaisia laitteistoja, kuin edellä mainitut. Yrityksen valikoimissa on mm. laitteita, joilla voidaan moottorin huollon aikana mitata osittaispurkauksia, joita muodostuu yli 3,3 kV nimellisjännitteisien moottorien staattorikämeissä kuluneiden eristeiden vuoksi, ja akselijännitteitä (Iris Power 2021).

3 Mittausten kulku ja mittaustulokset

Mittaukset suoritettiin LUT-yliopiston sähkökonehallissa. Kuvassa 3.1 on esitetty oikealla puolella moottori, jolle mittauksia tehtiin, sekä vasemmalla puolella kuormana toimiva moottori. Kuten kuvasta nähdään, koneiden väliin oli sijoitettu vääntömomenttianturi, ja koneiden ympärille on asetettu turvallisuussyistä suojakupu. Myös koneiden kiinnitykseen on panostettu, sillä moottorista mitattiin myös mekaanisia värähtelyjä, eikä alusta saa tällöin joustaa. Tämän vuoksi koneet on kiinnitetty suureen betonilaattaan kiinnitettyyn metalliseen alustaan.



Kuva 3.1. Tutkimuksen kohteena ollut voimakoneena käytetty nelinapainen 3 kW nimellistehoinen oikosulkumoottori (oikealla) sekä kuormakone (vasemmalla). Koneet on kytketty niiden välissä olevaan Magtrolin vääntömomentti- ja pyörimisnopeusanturiin.

Tutkittavina voimakoneina mittauksissa toimi viisi kappaletta IE3-hyötysuhdeluokan kriteerit täyttäviä ABB:n M2BAX 100LKA 4 oikosulkumoottoreita. Moottorien roottorit ovat häkkikämmittyjä ja moottorien nimellisteho on 3 kW ja nimellisyörimisnopeus 1445 1/min

syöttötaajuudella 50 Hz, ja moottorit ovat nelinapaisia (ABB 2021). Voimamoottorit olivat kolmiokytkennöissä, joten syöttöjännitteen tehollisarvon ollessa 400 V, pitäisi nimellisvirran tehollisarvon olla 6,10 A (ABB 2021). Kun yksi näistä moottoreista purettiin ja sen roottori halkaistiin, pystyttiin staattoriurien ja roottorisauvojen määrät laskemaan. Nämä moottorit sisältävät 26 roottorisauvaa (kts. kuva 2.3) ja 36 staattoriuraa (kts. kuva 2.2).

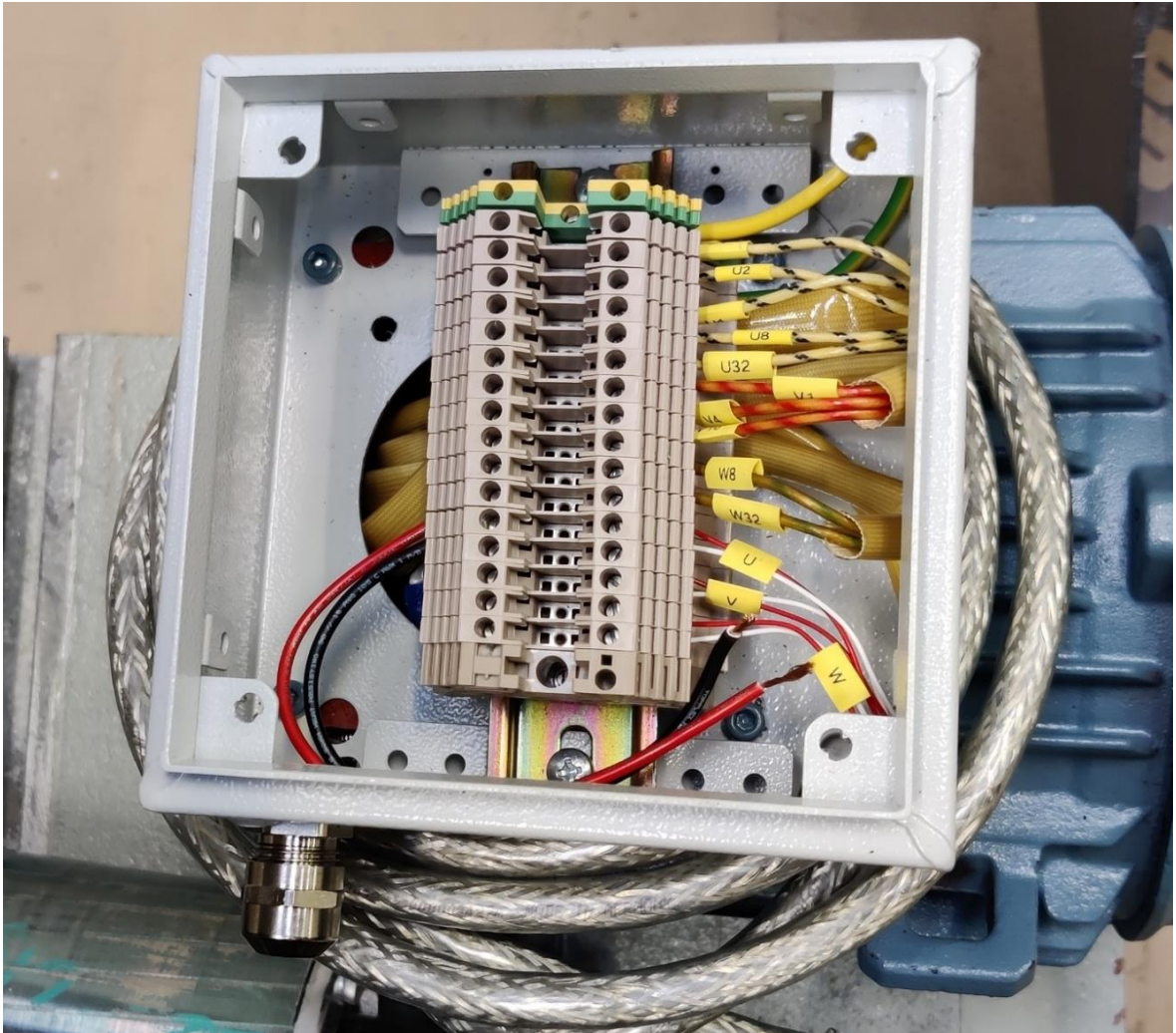
Yhteen mittausten kohteena olevista moottoreista tilattiin staattorin uudelleenikämitys siten, että tietyistä staattorikämmikierroksista olisi helposti tehtävissä galvaaninen yhteys tiettyihin muihin staattorikämmikierroksiin. Uudelleenikämityn moottorin liitäntäkotelon esitetty kuvassa 3.2.

Kuten kuvasta 3.2 nähdään, eri kytkentämahdollisuuksia moottorin staattorikämmiin on useita ja kytkennät on mahdollista tehdä niin, ettei jännitteellisiin osiin voi sormella koskea. Kuvassa näkyvät kytkemättömät johtimet (punainen ja musta) ovat lämpötila-anturin johtimia, eivätkä ne ole jännitteellisiä.

Käytetyissä moottoreissa on jokaisessa staattorikämmissä 300 kämmikierrosta. Yhdestä ehjistä koneesta mitattiin noin 23 °C lämpötilassa moottorin eri liittimien väliset DC-resistanssit ja todettiin, että ne ovat kaikkien kämmien yli likimain 4,13 Ω. Vikaresistansseja valittaessa tätä arvoa käytettiin vertailukohtana.

Kuten kuvasta 3.2 voidaan nähdä, uudelleenikämityn moottorin staattorikämmiin U, V ja W on mahdollista liittää johtimia. Staattorikämmillä U on käytössä kämmikierrokset 1, 2, 4, 8 ja 32, V:lä 1, 4 ja 16 ja W:la 8 ja 32.

Kuormakoneena käytettiin ABB:n 7,5 kW nimellistehoista M3BA 132 MB-4 -oikosulkumoottoria. Voimakoneena toimivaa oikosulkumoottoria syötettiin ABB ACS880-01-11A0-5+E200 -taajuusmuuttajalla kun taas kuormakonetta syötettiin ABB ACS880-01-017A-3+L503 -taajuusmuuttajalla. Moottoreiden tyyppikilvet löytyvät liitteistä (kts. liite 2).



Kuva 3.2. Mittauksissa käytetyn uudelleenkäämityn oikosulkumootorin liitäntäkotelo. Moottorin muokkaaminen mahdollisti staattorikämmikierrosten yhdistämisen toisiinsa ja maapotentiaaliin.

Mittausten aikana kuormakonetta ajettiin suoralla vääntömomentin säädöllä (DTC) siten, että koneen pyörimisnopeusohjeksi asetettiin 0 1/min ja suurin sallittu vääntömomenttiohje valittiin halutun kuorman mukaan. Tällöin kuormakone tuottaa vääntömomenttia vastakkaiseen suuntaan voimakoneen tuottamaan vääntömomenttiin nähden.

Voimakonetta ajettiin skalaarisäädöllä ja taajuusohjeella. Skalaarisäätöä käytettiin, jotta taajuusmuuttaja ei säätäisi konetta kuorman ja moottoriin tehtyjen vikojen vaikutuksien mukaan, eikä näin ollen peitä mahdollisia vikaindikaattoreita.

Mittauksissa käytettiin Yokogawa PX8000 -tehoanalysaattoria. Tehoanalysaattorin avulla saatiin mitatuksi vaihejännitteet, vaihevirratt ja eri vaiheiden tehot sekä tehokertoimet. Tehoanalysaattori on asetettu ottamaan näytteitä 200 kS/s näytteenottotaajuudella ja mittausaikana käytettiin 100,1 s pituista aikaa. Tehoanalysaattori yhdistettiin tietokoneeseen ja sen mittaama data tallennettiin LabView-ohjelmiston avulla tietokoneen kiintolevyllä analyysia varten. Tehoanalysaattorin ja muiden tärkeimpien mittaustaitteiden ja -antureiden mittauserpävarmuudet ja herkkyydet on esitetty taulukossa 3.1.

Analysoitavien virtojen mittaamiseen kaikista kolmesta vaiheesta käytettiin Yokogawan tehoanalysaattoriin liitettyjä Hitec CURACC -sarjan 300 A huippuvirrallisia virta-antureita. Virta-anturi on hyvin tarkka verrattuna käytettyyn tehoanalysaattoriin, mikä näkyy taulukossa 3.1 esitettyjen mittauserpävarmuuksien arvoista. Anturin kaistanleveys on tasavirrasta aina 100 kHz taajuiseen vaihtovirtaan asti (Yokogawa 2009).

Suurin mittauksissa käytettävä virran päätaajuus on 50 Hz. Työssä ei ole tarkoitus tutkia todella korkean taajuuden ilmiöitä, joten virta-anturi on tarpeeksi laajakaistainen tämän työn mittauksiin.

Tärinämittaukset suoritettiin Dewesoft Sirius -laitteella. Tähän laitteeseen kytkettiin kaksi kiihtyvyydsanturia, joiden avulla tärinädata saatiin kerättyä. Dewesoftin laite vaati erillisen ohjelman, DewesoftX:n käyttöä mittaustulosten tallentamiseen sekä muuntamiseen sellaiseen tiedostomuotoon, jossa dataa voidaan käsitellä muilla ohjelmistoilla. Koska datan käsittelyssä käytettiin MathWorksin MATLAB -ohjelmistoa, niin valinta kohdistui mat-tiedostotyyppiin.

Kiihtyvyydsanturit kiinnitettiin moottorin päihin. Toinen oli kiinnitettynä runkoon käyttöakselin puolelle ja toinen tuulettimen viereen tuuletinkoteloon. Kiihtyvyydsanturien avulla saatiin mitattua moottorin tärinän, eli mekaanisen edestakaisen liikkeen, taajuussisältö.

Taulukko 3.1. Mittauksissa käytetyt mittalaitteet ja niiden mittausepävarmuudet sekä herkkyudet (Francey (Magtrol) 1997; IEC 60751:2008; Keithley 2002; Yokogawa 2009; Yokogawa 2014; Yokogawa 2017).

Mitattava suure	Käytetty mittalaite	Mittalaitteen mittausepävarmuus	Mittalaitteen herkkyys
U [V]	Yokogawa PX8000	$\pm (0,2 \% \text{ mittalukemasta} + 0,1 \% \text{ mittausalueesta})$, taajuusalueella $10 \text{ Hz} \leq f < 45 \text{ Hz}$, $\pm (0,1 \% \text{ mittalukemasta} + 0,1 \% \text{ mittausalueesta})$, taajuusalueella $45 \text{ Hz} \leq f < 1 \text{ kHz}$, $\pm (0,1 \% \text{ mittalukemasta} + 0,1 \% \text{ mittausalueesta})$, taajuusalueella $1 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ kHz}$	560 mV / 600 V
I [A]	Yokogawa PX8000 Hitec Zero-Flux CURACC (300 A huippu- virta)	$\pm (0,2 \% \text{ mittalukemasta} + 0,1 \% \text{ mittausalueesta})$, taajuusalueella $10 \text{ Hz} \leq f < 45 \text{ Hz}$, $\pm (0,1 \% \text{ mittalukemasta} + 0,1 \% \text{ mittausalueesta})$, taajuusalueella $45 \text{ Hz} \leq f < 1 \text{ kHz}$, $\pm (0,1 \% \text{ mittalukemasta} + 0,1 \% \text{ mittausalueesta})$, taajuusalueella $1 \text{ kHz} \leq f < 10 \text{ kHz}$ $\pm (0,01 \% \text{ mittalukemasta} + 0,002 \% \text{ mittausalueesta})$	14 mA / 15 A
T [Nm]	Magtrol TM210	$\pm (0,1 \% \text{ mittausalueesta})$, kun mitattava vääntömomentti on nimellinen, eli 50 Nm	
t [°C]	Keithley 2701 Pt100 (A- luokka)	$\pm 0,06 \text{ °C}$ $\pm (0,15 + 0,002 t) \text{ °C}$	

Moottorin vääntömomentti ja pyörimisnopeus mitattiin moottorin ja kuorman väliltä Magtrol TM 210 -vääntömomenttianturilla. Anturin nimellisvääntömomentti on 50 Nm, pienin anturin havaitsema pyörimisnopeus on 10 1/min ja pienin pyörimisnopeus, joka mahdollistaa pyörimissuunnan havaitsemisen, on 20 1/min (Francey (Magtrol) 1997).

Lämpötilaa mitataan kolmesta eri pisteestä mittausten aikana. Lämpötilaa mitataan Keithley 2701 Multimeterilla, jossa on kiinni Pt100-lämpötila-anturit. Lämpötilaa mitataan moottorin rungosta, moottorin liitännäkotelon sisältä käämien päistä sekä moottorin läheltä ilmasta, jotta laboratorion huoneilman lämpötilanvaihteluiden vaikutus voidaan tarvittaessa huomioida mittaustuloksien dataa käsitellessä.

Taajuusmuuttajat liitettiin samaan välipiiriin. Tämä mahdollistaa sen, että kuormakoneen tuottama sähköteho käytetään moottorin pyörittämiseen, eikä sitä syötetä takaisin verkkoon. Tällöin verkosta tarvitaan tehoa vain pyörimisnopeuden kiihdyttämiseen ja häviötehon korvaamiseen.

Työssä mitatun datan käsittelyyn käytettiin MathWorksin MATLAB-ohjelmistoa. Työssä ei simuloitu tietokoneohjelmistoilla mitään, vaan ohjelmistoa käytettiin apuna mittaustulosten analysoinnissa. Tämä analysoitu mittaustulosten data oli samaa raakadataa, jota tehoanalyytikko käytti esimerkiksi sähkötehojen laskentaan. Ohjelmiston avulla laskettiin mm. moottorien vaihevirtojen symmetrisien komponenttien arvot, virtojen ja jännitteiden tehollisarvot ja virtojen THD-arvot. MATLAB-ohjelmiston avulla myös suoritettiin virran FFT-operaatio, joka mahdollisti virran taajuuskomponenttien analysoinnin.

Jokaisessa mittauspisteessä mittaukset suoritettiin viidessä eri toimintapisteessä, joissa moottorin pyörimisnopeutta ja kuormitustasoa muutettiin. Käytännössä siis voimakonetta syöttävän taajuusmuuttajan taajuusohjetta ja kuormakoneen suurinta sallittua vääntömomenttiohjetta muutettiin. Nämä toimintapisteet olivat 35 Hz 100 % kuormalla nimelliskuormasta, 50 Hz 100 % kuormalla, 35 Hz 75 % kuormalla, 35 Hz 50 % kuormalla ja 20 Hz 50 % kuormalla.

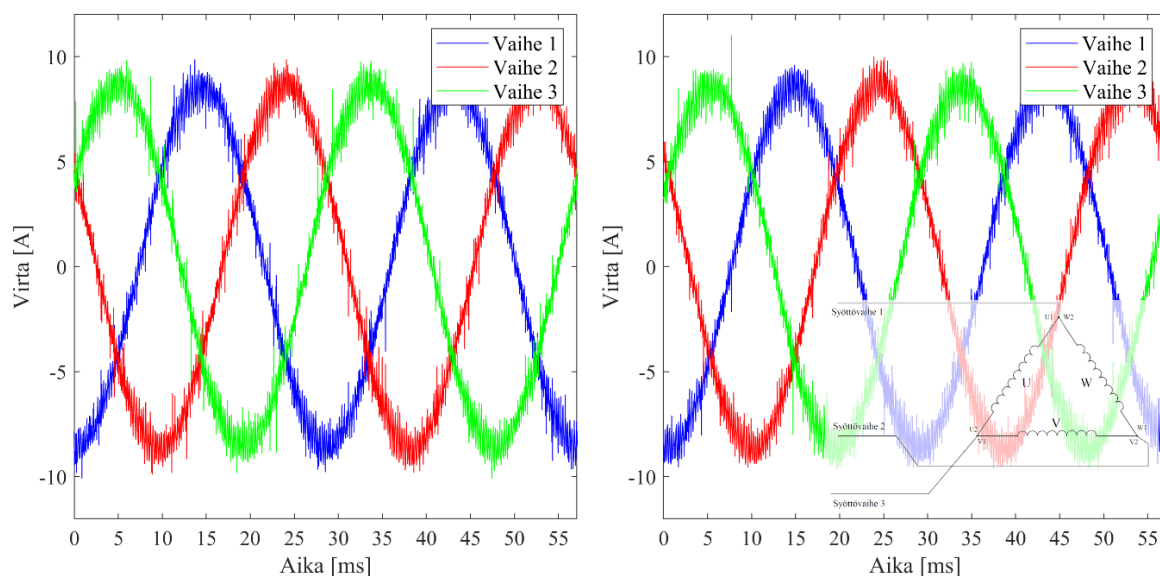
Oikeasti moottoreita ei voida varmuudella sanoa edes uusina täysin ehjiksi, mutta tässä työssä mittauspisteitä, joissa moottoriin ei joko ole luotu vikoja tai joista viat on poistettu, kutsutaan ehjän moottorin mittauspisteiksi. Mittaustuloksia esittävässä kuvassa nämä ehjään viittaavat mittauspisteet ovat referenssimittauksia, joita tehtiin selvästi viallisen ja oletettavasti ehjän moottorin vertailtavuuden vuoksi.

Seuraavissa kappaleissa käydään läpi, kuinka erilaiset viat tehtiin ja millaisia tuloksia mittaustuloksissa ilmeni. Lopuksi käydään läpi, mitä mittaustuloksista selvisi. Mittaustuloksista on valittu esitettäväksi kuvaajia ja vikaindikaattoreita, joista eri vikoja voidaan helposti havainnoida. Muita kuvaajia on esitetty liitteessä 3.

3.1 Moottorin syöttöviat

Jotkin viat on pakko toteuttaa moottoriin oikeasti niiden vaikutuksien havaitsemiseksi, mutta esimerkiksi syöttövikoja voidaan emuloida kytkemällä vastuksia sarjaan tai rinnan eri komponenttien kanssa. Vastuksilla voidaan aiheuttaa epätasapainoa syöttöpuolelle, millä emuloitiin sekä epäsymmetristä syöttöä, että huonosti kiinnitettyä syöttökaapelia. Näistä jälkimmäinen voi aiheuttaa syöttökaapelin ja liittimien väliin ylimääräistä resistanssia pienentyneen kontaktipinta-alan vuoksi.

Ensimmäinen toteutettu syöttöviika oli vaihejohtimien kytkeminen moottoriin väärin päin. Vaiheiden 2 ja 3 johtimet kytkettiin ristiin, mikä saa moottorin pyörimään vastakkaiseen suuntaan kuin normaalisti. Kuvassa 3.3 on esitetty sekä ehjän moottorin (kuvassa vasemmalla), että vertailun vuoksi väärin kytketyn moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaajat (kuvassa oikealla) kaikista kolmesta vaiheesta. Kuvan toimintapisteenä on 35 Hz virran taajuus 100 % kuormalla.



Kuva 3.3. Kuvan vasemmalla puolella on ehjän moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaaja. Oikealla puolella nähdään vaihevirrät moottorista, jonka kaksi syöttöjohdinta on kytketty väärin päin. Tämä ei kuitenkaan näy vaihevirroissa lainkaan, sillä virtamittaukset tehtiin taajuusmuuttajan ja moottorin välillä, eli ennen ristiinkytentää. Mikäli virtamittaus olisi

tehty ristiinkytken jälkeen, olisi aaltomuotojen järjestys oikeanpuoleisessa kuvassa päinvastainen. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuten kuvasta 3.3 nähdään, ei tämä vika aiheuta muutoksia vaihevirtojen aaltomuotoihin. Tämä johtuu siitä, että virtamittaus tehtiin taajuusmuuttajan ja moottorin välissä, jolloin mitään vikaa ei voida nähdä. Vika näkyi moottorista ulospäin vain siten, että pyörimisnopeus oli päinvastainen. Taajuusmuuttaja saatiin pyörittämään moottoria ilman ongelmia, kun virheentarkistus kytkentävian osalta ohitettiin taajuusmuuttajan asetuksista.

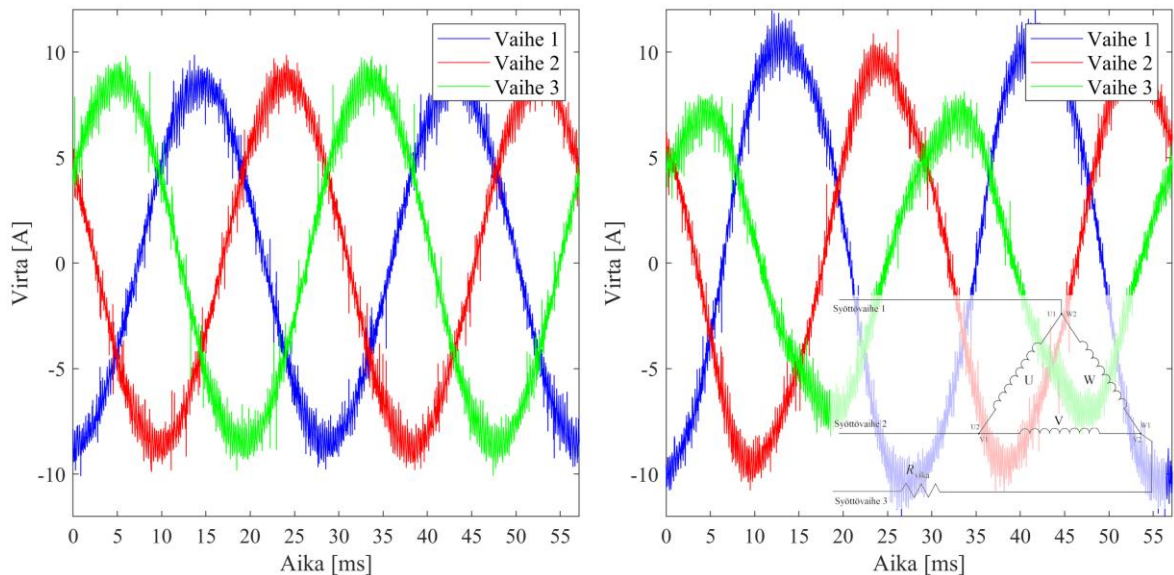
Toiset emuloidut viat ovat moottorin epäsymmetrinen vaihevirta, sekä syöttökaapelin huono kontakti moottorin syöttöliittimiin. Nämä viat toteutettiin keskenään samalla tavalla siten, että vaiheen 3 syöttökaapelin ja staattorikäämin välille sarjaan lisättiin säätövastus, sillä huonosti kiinni oleva kaapeli voi muodostaa pienemmän kontaktipinta-alan, jolloin resistanssi kasvaa. Kytkentä on esitetty kuvassa 2.11. Tämä myös samanaikaisesti aiheuttaa moottorin epäsymmetrisen vaihevirran, taajuusmuuttajasta oli kytketty epätasaista virtaa kompensoivat toiminnot pois, joten moottoria syöttävä jännite oli amplitudiltaan jokaisessa syöttöjohtimessa yhtä suuri.

Yhdessä johtimessa resistanssin ollessa suurempi, on sen virta tällöin pienempi Ohmin lain mukaisesti, kuin johtimessa, jossa resistanssi on pienempi. Tällöin eri syöttöjohtimissa kulkevat virrat eivät ole keskenään yhtä suuria, vaan niiden välillä on epätasapainotila.

Mittauksissa säätövastuksella kokeiltiin neljää eri resistanssin arvoa, jotka kuvasivat vian vakavuutta siten, että suurempi resistanssi on suurempi vika, koska resistanssin kasvaessa epätasapaino syöttävien vaihejohtimien välillä kasvaa. Nämä mittauksissa käytetyt resistanssin arvot olivat $0,6 \Omega$, $0,9 \Omega$, 2Ω ja 5Ω . Nämä arvot valittiin siksi, että olisi sekä pieniä, että suuria vikoja staattorin virtapiiriin $4,13 \Omega$ resistanssiin verrattuna.

Kuvassa 3.4 on esitetty moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaajat. Kuvassa vasemmalla on ehjän moottorin ja oikealla 5Ω vikaresistanssilla varustettu epäsymmetrinen syöttö. 5Ω valittiin vikaresistanssiksi aaltomuotokuvaajaan, koska se oli suurin tämän vian kohdalla kokeiltu vikaresistanssin arvo, joten eroavaisuudet ehjään moottoriin ovat huomattavimmat. Kuten kuvasta nähdään, on epäsymmetrian suuretessa jo aaltomuodosta silmin nähtävissä eroavaisuutta ehjän moottorin aaltomuotokuvaajaan. Eri vaiheiden vaihevirtojen amplitudit

eroavat toisistaan huomattavasti. Lisäksi vian voi kuulla myös aistinvaraisesti moottorin käyntiäänestä.

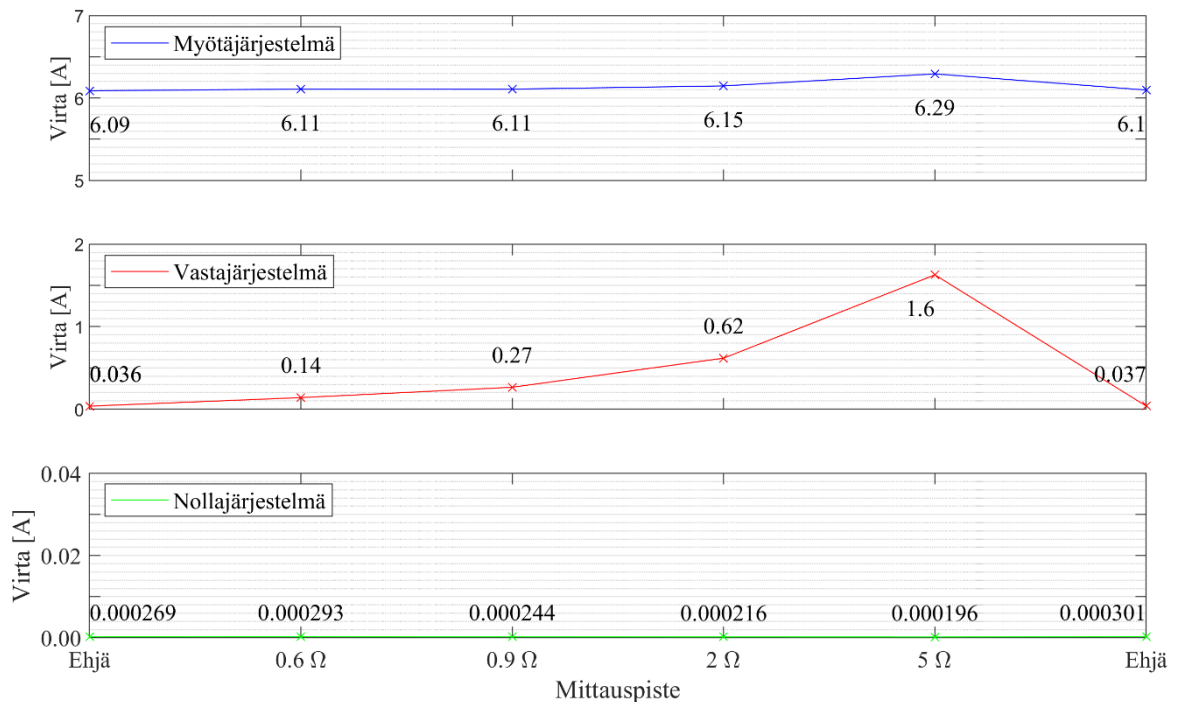


Kuva 3.4. Ehjän moottorin (vasemmalla) ja epäsymmetrisesti syötetyn moottorin (oikealla) vaihevirrat. Säätoivastus asetettiin arvoon 5Ω . Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.4 nähdään, että moottorin vaihevirtojen amplitudit ovat huomattavan epätasaiset vikaresistanssin ollessa 5Ω . Vaiheen 3 amplitudi on vaiheiden 1 ja 2 vaihevirtojen amplitudeja pienempi. Virtojen epätasapainon vuoksi vika aiheuttaa muutoksia symmetristen komponenttien amplitudeissa. Nämä näkyvät kuvassa 3.5 eri asteisten vikojen ollessa toteutettuna, sekä vertailukohtaksi sekä ennen, että jälkeen toteutettujen vikojen ehjän moottorin tapauksessa.

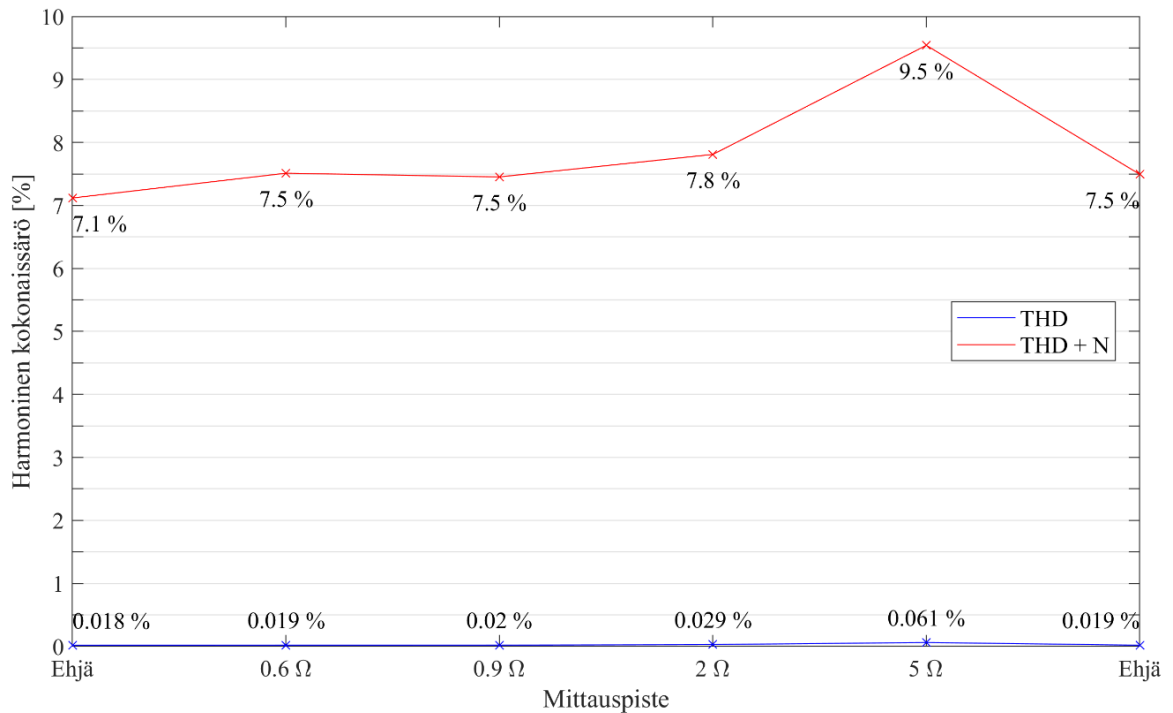
Kuvan 3.5 mukaisesti näyttäisi siltä, että moottorin vaihevirtojen vastakomponenttien amplitudi nousee sitä mukaan, kun resistanssi kasvaa, eli kun vika pahenee. Myös myötäkomponentin arvo näyttäisi hiukan nousevan, mutta tämä nousu on hyvin pientä. Myötäkomponentin amplitudin nousu vikavastuksen ollessa 5Ω oli vain 3 % ehjän moottorin myötäkomponentin amplitudista, mutta vastakomponentin nousu oli huomattavaa ja sen arvo moninkertaistui verrattuna ehjän moottorin vaihevirtojen vastakomponentin amplitudiin.

Nollakomponentin arvot puolestaan hiukan jopa pienenevät, mutta muutokset ovat erittäin pieniä.



Kuva 3.5. Moottorin vaihevirtojen symmetriset myötä-, vasta- ja nollakomponentit säätövastuksen avulla emuloidun epäsymmetrisen syöttövian eri mittauspisteissä. Kuvassa on esitetty myös referenssimittauksien tulokset ehjällä moottorilla sekä ennen mittauksia, että niiden jälkeen. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma. Myötä-, vasta- ja nollajärjestelmän kuvaajien pystyakselit on valittu samoiksi kaikkien eri vikatyypin kesken, minkä vuoksi nollakomponentin kuvaaja ei joidenkin vikojen tapauksissa näkyvästi kohoa nollan yläpuolelle, kuten tässä kuvassa on nähtävissä.

Kuvassa 3.6 nähdään moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaaliset arvot, moottorin epäsymmetrisen syötön tapauksessa eri vikaresistansseilla, sekä vertailukohtana ehjän moottorin vastaavat arvot. Ehjän moottorin arvot on mitattu sekä ennen moottorin vikatilaa, että vian poiston jälkeen. Toimintapisteenä on 35 Hz vaihevirtojen päätaajuus ja kuormakoneen vääntömomenttiohjeena on 100 % moottorin nimellisestä vääntömomentista.



Kuva 3.6. Epäsymmetrisesti syötetyn moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaaliset arvot eri vikaresistansseilla sekä ehjällä moottorilla ennen vikaa ja vian jälkeen. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.6 nähdään, että vikaresistanssin arvolla 5 Ω moottorin vaihevirtojen THD:n prosentuaalinen arvo kasvaa ehjän moottorin virtojen THD:n arvoon verrattuna. Mitä suurempi käytetty vikaresistanssi on, sitä suurempi myös THD:n arvo on. Moottorin vaihevirtojen THD+N: prosentuaalinen arvo näyttäisi nousevan vikaresistanssin kasvaessa vielä enemmän, kuin THD:n arvo. Yhtälöiden 2.2 ja 2.3 perusteella tämä johtuu moottorin vaihevirrän kohinakomponenttien lisääntymisestä, joka on virran THD:n ja THD+N:n toisistaan erottava tekijä.

Mittaustulosten perusteella syöttöviat ovat havaittavissa vikaindikaattoreilla, jotka on esitetty taulukossa 3.2. Taulukoidut vikaindikaattorit ovat niitä, joiden havaittiin muuttuvan eniten, kun moottoriin toteutetaan jokin syöttövika.

Taulukko 3.2. Vikaindikaattorit, joiden perusteella syöttöviat ovat havaittavissa.

Vika	Vikaindikaattorit
Ristiin kytketyt vaihejohtimet	Moottori pyörii vastakkaiseen suuntaan kuin sen pitäisi pyöriä.
Epäsymmetrinen syöttö	Moottorin vaihevirtojen vastakomponentin arvo kasvaa. Pahimman toteutetun vian, eli vikaresistanssin ollessa 5Ω , vastakomponentti oli noin 44-kertainen verrattuna ehjän moottorin vaihevirtojen vastakomponenttiin. Myös moottorin vaihevirtojen THD:n arvo suurin piirtein kolminkertaistui pahimman toteutetun vian tapauksessa.

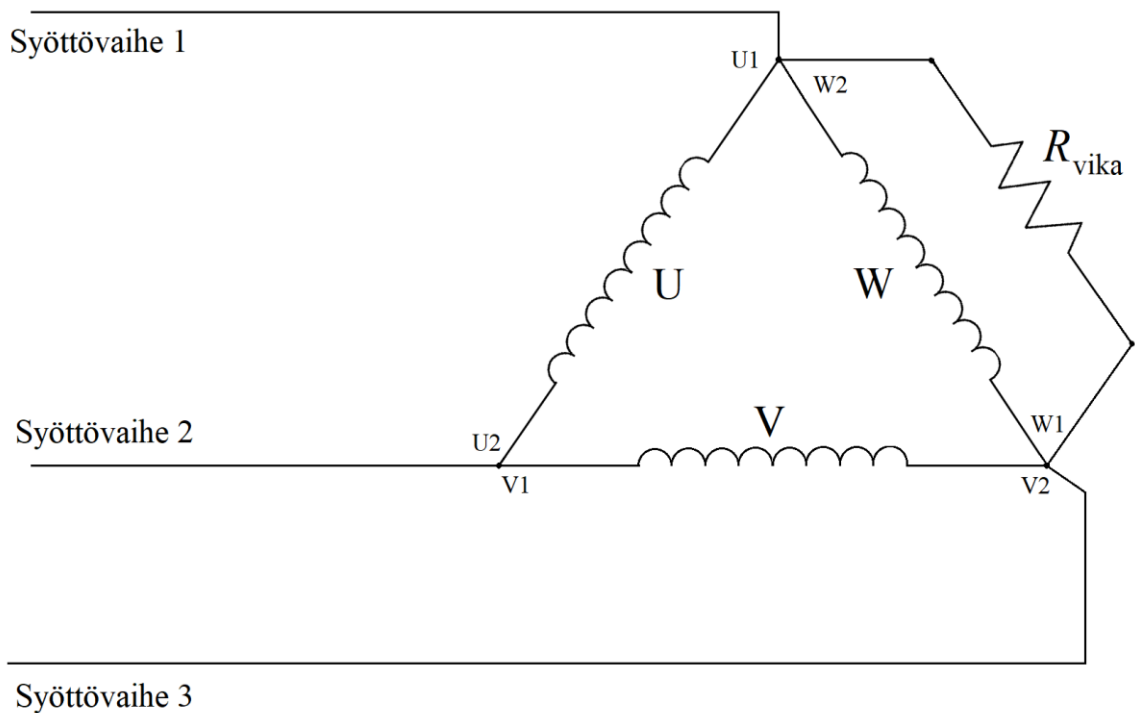
Kuten taulukossa 3.2 nähdään, parhain vikaindikaattori syöttövikojen havainnointiin on moottorin vaihevirtojen vastakomponentin kasvu. Vaihejohtimien keskenään väärin päin kytkeminen taas havaitaan parhaiten siitä, että moottori pyörii vastakkaiseen suuntaan, kuin olisi tarkoitus pyöriä.

3.2 Staattoriviat

Kuten syöttövikoja, niin myös joitakin staattorin vikoja pystytään emuloimaan kytkemällä vastuksia moottorin kytkentöihin. Esimerkiksi käämikierrosten välisien oikosulkujen toteuttaminen taas käytännössä vaati ajatun moottorin uudelleenkäämityksen siten, että tiettyihin käämikierroksiin pystyttiin liittämään johtimia, kuten kuvasta 3.2 näkyy. Tämä mahdollisti sen, että eri staattorikäämikierroksia voitiin osittain oikosulkea vastuksen kautta keskenään tai maapotentiaaliin.

3.2.1 Staattorikäämien kierrossulku

Ensimmäinen staattorivika on staattorikäämin kierrossulku kuvan 2.8 mukaisesti. Vian oikeanlaiseen toteutukseen tarvittiin mittauksia varten uudelleenkäämitty moottori, mutta mittauksia tehtiin myös ilman sitä emuloimalla vikaa kytkemällä säätövastus kokonaisen staattorikäämin yli. Näin osa sähkövirrasta kulkee staattorikäämin sijaan vikavirtapiiriä pitkin. Kuvasta 3.7 on mahdollista nähdä, kuinka emuloitu kierrossulku toteutettiin staattorikäämiin W.



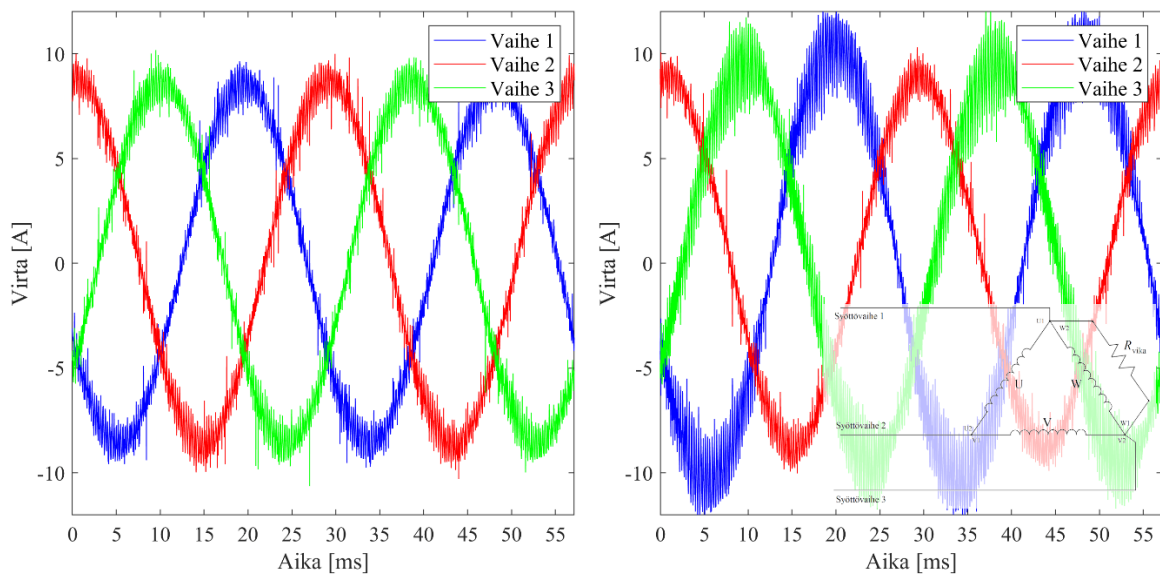
Kuva 3.7. KytKentä, jolla emuloitiin staattorikäämin W kierrossulkuvikaa. Tilanne eroaa oikeasta viasta, sillä vastus kytkettiin koko staattorikäämin rinnalle, eikä tiettyjen staattorikäämikierrosten välille.

Viasta tehtiin mittaukset usealla eri säätövastuksen resistanssin arvolla, jotka olivat emuloidun vian tapauksessa 207Ω , 415Ω , 830Ω ja 1632Ω rinnankytkettynä koko staattorikäämin yli kuvan 3.7 mukaisesti. Uudelleenikämityn moottorin tapauksessa (kuvan 2.8 mukainen kytkentä) vikaresistanssin arvot olivat 50Ω ja 7Ω sekä yhdistäessä U-staattorikäämin 8. kierros ja U-staattorikäämin 32. kierros toisiinsa, että yhdistäessä W-staattorikäämin 8. kierros ja W-staattorikäämin 32. kierros toisiinsa. Näistä jälkimmäisessä tapauksessa mitaukset suoritettiin myös 2Ω vikaresistanssilla.

Edellä mainitut emuloidun vian tapauksessa käytetyt resistanssin arvot valittiin huomattavan suuriksi verrattuna koko staattorikäämin virtapiiriin DC-resistanssiin $4,13 \Omega$ nähden, koska vastus kytkettiin rinnan koko staattorikäämin virtapiiriin kanssa, eikä vikavirran haluttu kasvavan liian suureksi. Vastuksen ollessa kytketty staattorikäämin virtapiiriin kanssa rinnan, mitä pienempi resistanssi on, sitä suurempi osa virrasta kulkee vikavirtapiiriin kautta käämin sijaan, joten vian vakavuus kasvaa resistanssin laskiessa.

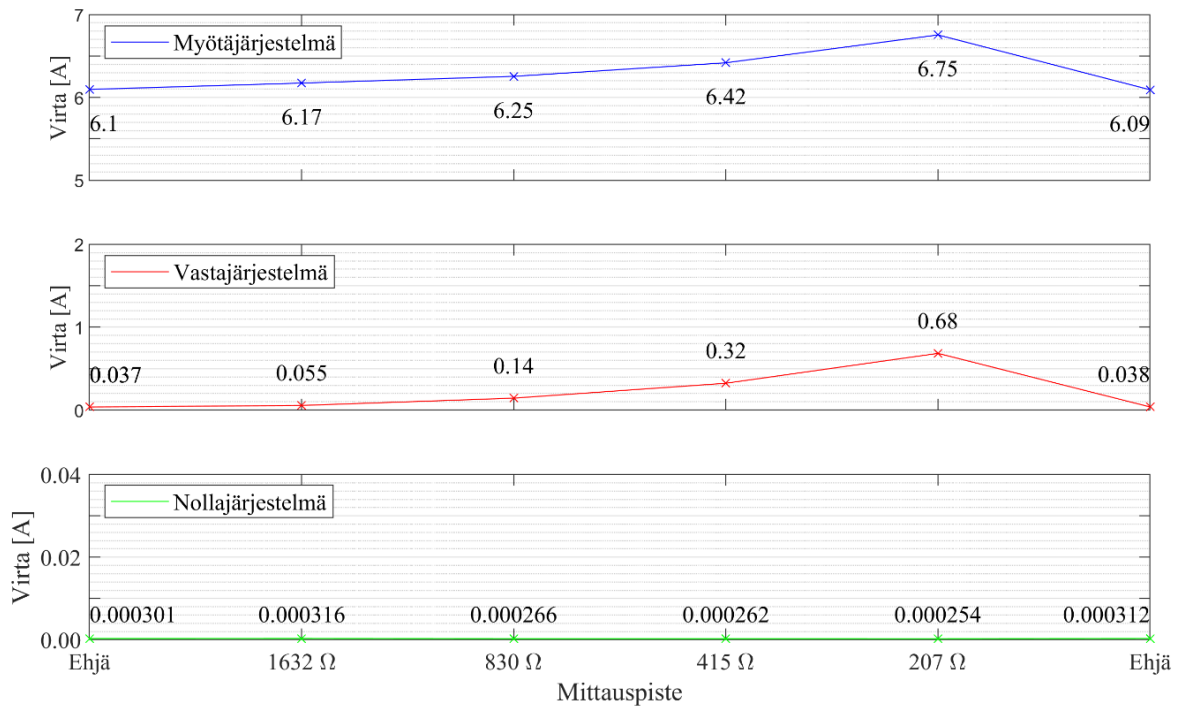
Uudelleenkäämityn moottorin viassa oli koko staattorikäämin virtapiirin sijaan kytketty vastus vain 24 käämikierroksen kanssa rinnan, joten paljon pienempiä resistanssin arvoja voitiin käyttää. Käämikierroksia oli kokonaisuudessaan yhdessä staattorikäämässä 300 kappaletta, joten vain 8 % kierroksista oli osittaisessa oikosulussa. Tämän vuoksi emuloitua ja toteutettua vikaa voidaan pitää suurin piirtein yhtä vakavina.

Kuvassa 3.8 on esitetty moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaaja, kun moottoriin on toteutettu emuloitu staattorikäämien kierrossulkuvika. Käytetty vikaresistanssi on 207Ω , koska tämä on mittauksissa käytetyistä vikaresistansseista vakavimman vian aiheuttava arvo. Käytetyllä vikaresistanssilla erojen ehjään moottoriin pitäisi olla parhaiten havaittavissa. Kuvasta on selvästi nähtävissä, että viallisen moottorin syötön vaiheiden 1 ja 3 vaihevirtojen amplitudit eivät ole enää samat kuin ehjän moottorin, vaan virtojen amplitudien välillä on selvää epätasapainoa.



Kuva 3.8. Vasemmanpuoleisesta kuvasta voidaan nähdä ehjän moottorin vaihevirtojen aaltomuodot jokaisesta kolmesta vaiheesta ennen aiheutettua vikaa. Oikeanpuoleisesta kuvasta nähdään moottorin vaihevirtojen aaltomuodot, kun moottoriin on aiheutettu emuloitu staattorikäämikierrosten välinen oikosulku. Vikaresistanssiksi on valittu 207Ω ja toimintapisteinä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

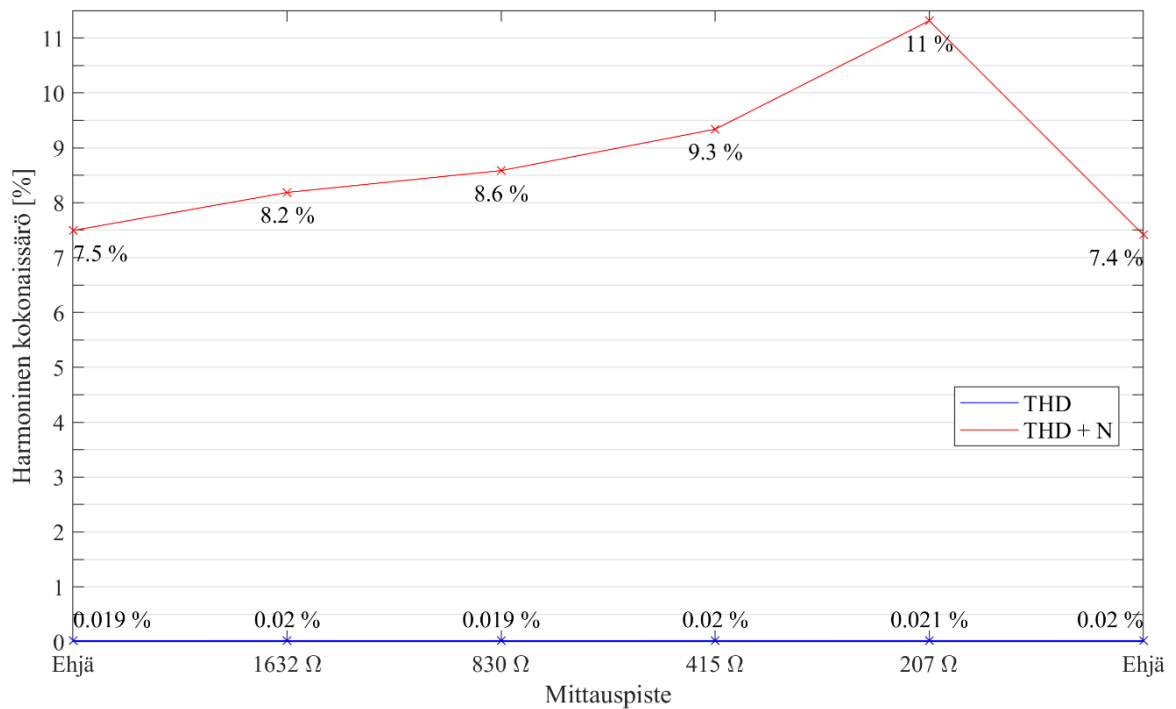
Kuvasta 3.9 nähdään moottorin vaihevirtojen epäsymmetrisen järjestelmän symmetrisien komponenttien amplitudit emuloidun vian tapauksessa eri vikaresistanssin arvoilla, sekä kaksi ehjän moottorin arvoa vertailukohtana.



Kuva 3.9. Moottorin vaihevirtojen epäsymmetrisen järjestelmän symmetriset myötä-, vasta- ja nollakomponentit niin ehjästä moottorista, kuin staattorikäimin emuloidun kierrossulun tapauksessa. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Emuloidun vian tapauksessa näyttäisi kuvan 3.9 perusteella siltä, että sekä virtojen myötä- että vastakomponenttien amplitudit nousivat. Huomattavasti suurempaa nousua oli vastakomponenttien puolella, missä tulos 207 Ω vikaresistanssilla kasvoi lähes kaksikymmenkertaiseksi ehjään koneeseen verrattuna. Sen sijaan nollakomponentin amplitudin arvo hiukan laski vian pahentuessa. Tämä lasku oli kuitenkin hyvin pientä.

Kuvassa 3.10 on esitetty kuvaaja, josta nähdään moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaaliset arvot emuloidun staattorikäimien kierrossulkuvian tapauksessa eri vikaresistansseilla. Vertailukohtana on ehjän moottorin arvot sekä ennen vian toteutusta, että vian poistamisen jälkeen.



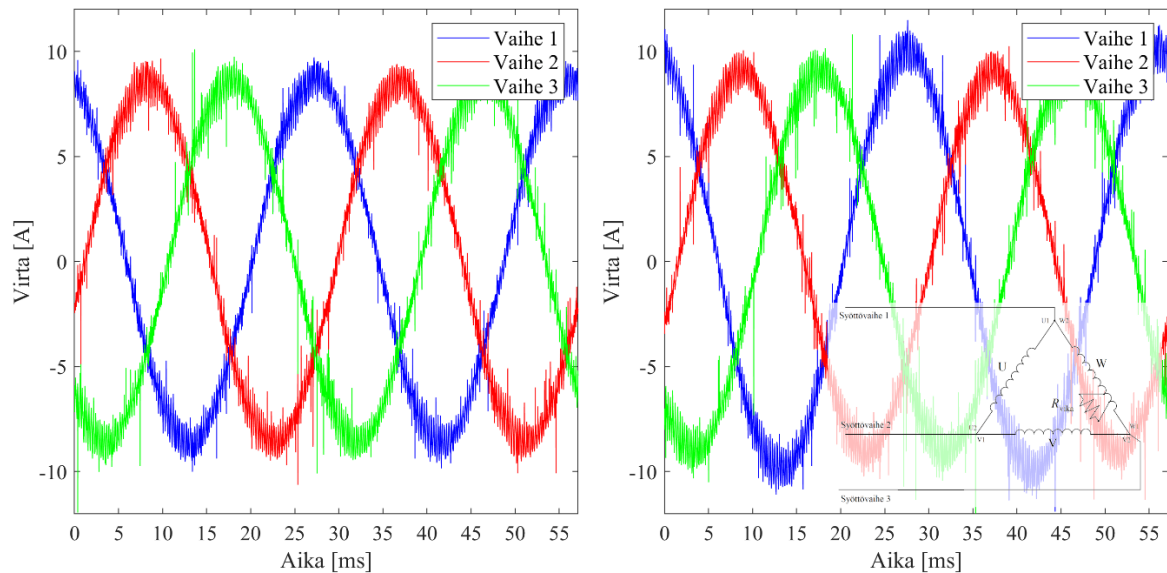
Kuva 3.10. Moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaaliset arvot moottorissa, johon on toteutettu emuloitu staattorikäämien kierrossulku. Kuvasta nähdään, että THD+N:än prosentuaaliset arvot nousevat usealla prosenttiyksiköllä vikaresistanssin laskeissa ehjään moottoriin verrattuna. Toimintapisteinä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Emuloidun vian tapauksessa moottorin vaihevirtojen THD:n prosentuaalinen arvo muuttuu hyvin vähän, vain prosenttiyksikön tuhannesosien verran. Vaihevirtojen THD+N:än arvo kuitenkin nousee useamman prosenttiyksikön verran.

Staattorikäämien kierrossulkuvika toteutettiin myös uudelleenikäämyllä moottorilla. Tätä kytkentää havainnollistaa kuva 2.8. Kun U-staattorikäämin 8. ja 32. käämikierros oikosuljettiin keskenään, niin vikavirtapiiri ohitti 8 % staattorikäämin käämikierroksista.

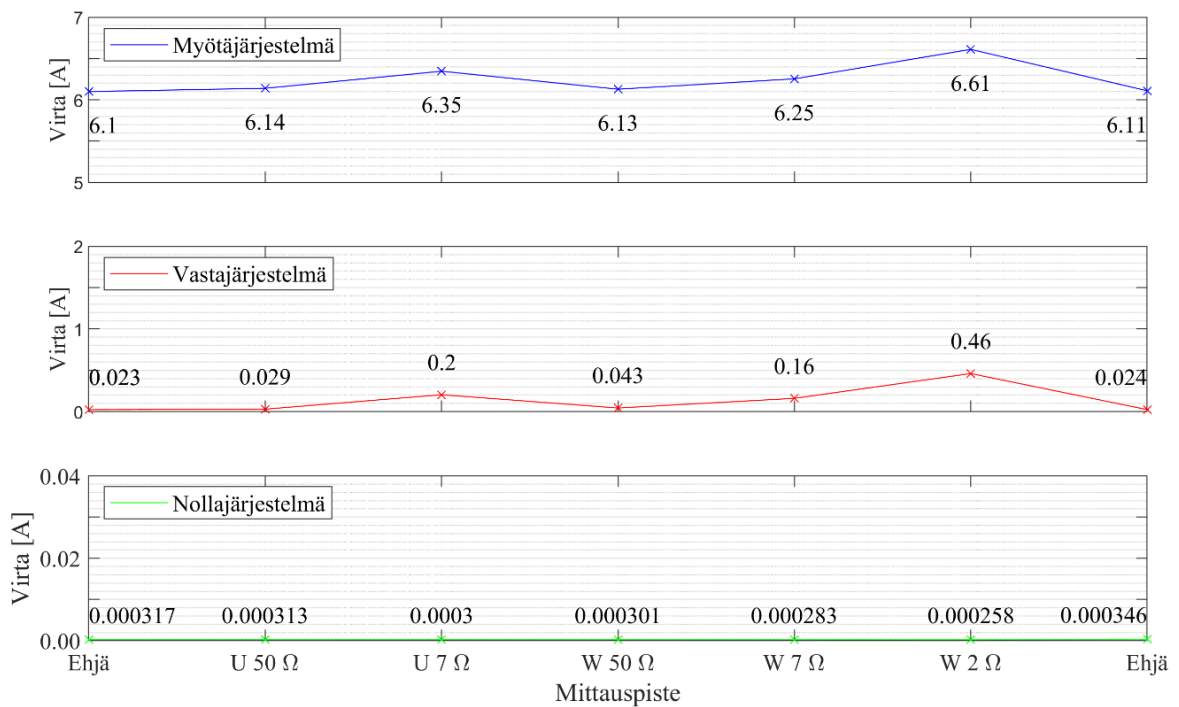
Moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaajat uudelleenikäämyllä moottorilla on esitetty kuvassa 3.11 toimintapisteessä, jossa vaihevirtojen päätaajuus on 35 Hz ja kuormakoneen vääntömomentin ohjearvona on 100 % moottorin nimellisestä vääntömomentista. Kuten

kuvasta nähdään, niin muutokset ovat melko pieniä. Vaiheen 1 virta on hiukan kasvanut suhteessa muiden vaiheiden virtoihin.



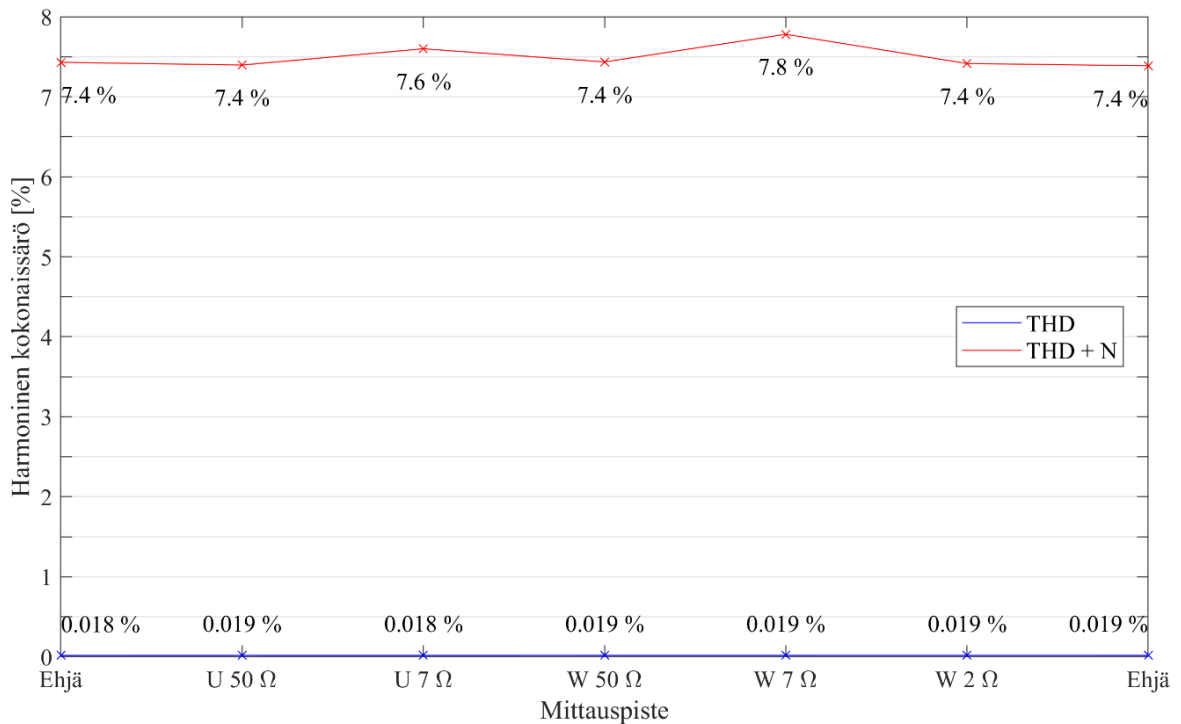
Kuva 3.11. Vasemmalla puolella on ehjän moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaaja ja oikealla puolella on kierrossulkuviallisen moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaaja. Toimintatapiteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvassa 3.12 on esitetty moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit eri vikaresistanssien arvoilla eri staattorikäämeihin aiheutetuilla kierrossuluilla. Vertailukohtaksi on lisätty ehjien koneiden virtojen symmetriset komponentit sekä ennen, että jälkeen vian toteutuksen. Kuvasta nähdään, että virtojen myötäkomponentti kasvaa vian pahentuessa, eli resistanssin arvon laskiessa, mutta vielä enemmän nousee vastakomponentti. Nollakomponentin suhteen suurta muutosta ei ole nähtävissä.



Kuva 3.12. Moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit uudelleenkäämittyyn koneeseen toteutettujen staattorikäämien kierrossulkuvikojen tapauksessa. U viittaa staattorikäämin U 8. ja 32. käämikierrosten väliseen kierrossulkuun tietyllä vikaresistanssin arvolla ja W viittaa staattorikäämin W 8. ja 32. käämikierrosten väliseen kierrossulkuun tietyllä vikaresistanssin arvolla. Vertailussa täytyy ottaa huomioon, että kummankin staattorikäämin kierrossulku tapauksessa on oikosuljettujen käämikierrosten määrät keskenään samat. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvassa 3.13 on esitetty moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaaliset arvot staattorikäämien kierrossulkuvikojen tapauksessa. Vertailun vuoksi myös ehjän moottorin arvot ennen vikaa ja vian poistamisen jälkeen on esitetty kuvassa.



Kuva 3.13. Uudelleenikämittyyiin moottoriin toteutettujen staattorikäämien kierrossulkuvikojen aiheuttamat moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaaliset arvot ja vertailukohtana ehjän moottorin arvot. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

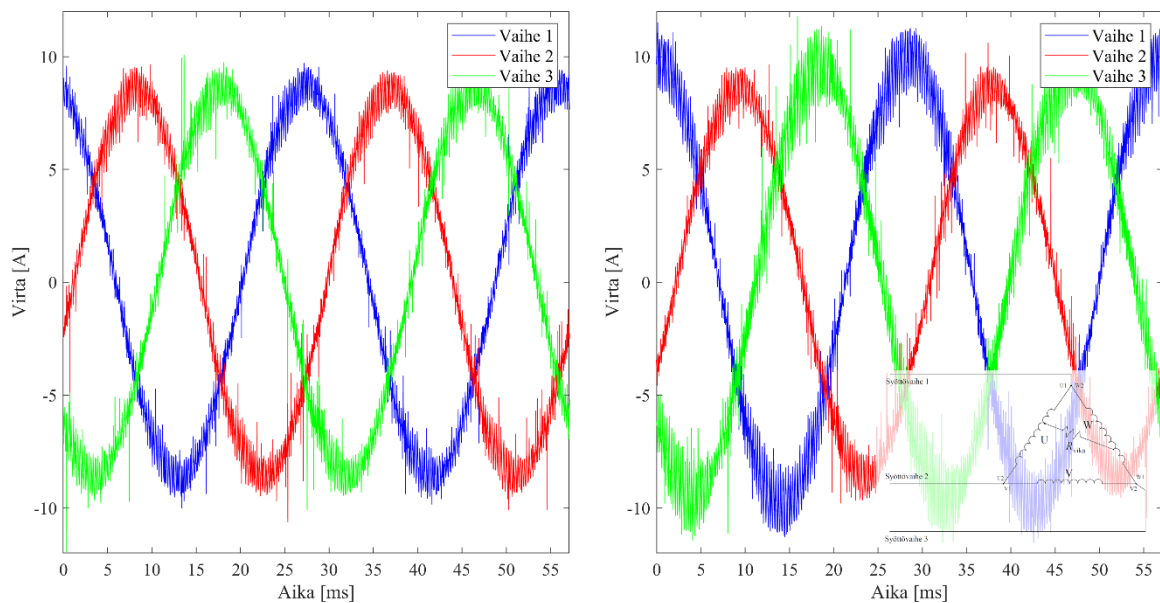
Kuvasta 3.13 nähdään, että moottorin vaihevirtojen THD:n prosentuaaliset arvot eivät tässäkään tapauksessa juuri muutu, mutta sen sijaan moottorin vaihevirtojen THD+N:n prosentuaaliset arvot kasvavat muutamia prosenttiyksikön kymmenyksiä 7 Ω vikaresistanssilla. 50 Ω ja 2 Ω vikaresistansseilla THD+N:än arvo on kuitenkin sama kuin ehjällä moottorilla. Kuvia 3.10 ja 3.13 vertaamalla voidaan nähdä, että kohinan määrä moottorin vaihevirroissa on noussut emuloidun vian myötä enemmän kuin oikean vian myötä.

3.2.2 Staattorikäämien käämisulku

Staattorikäämien käämisulkuvika toteutettiin mittauksia varten siten, että uudelleenikämitetty moottorin U-staattorikäämin 32. ja W-staattorikäämin 32. käämikierros yhdistettiin säätövastuksen kautta jo aiemmin esitetyn kuvan mukaisella tavalla (kts. kuva 2.7). Säätövastuksen resistanssin arvoina käytettiin arvoja 207 Ω, 415 Ω, 830 Ω ja 1632 Ω. Resistanssin

arvot olivat suuria verrattuna staattorikäämin virtapiirin DC-resistanssiin $4,13 \Omega$, jotta käämit eivät vahingoittuisi. Vian pitäisi olla sitä suurempi, mitä pienempää resistanssin arvoa käytetään. Tämä johtuu siitä, että vikaresistanssin ollessa pienempi, yhä suurempi osa sähkövirrasta kulkee vikavirtapiirin kautta staattorikäämin virtapiiristä toiseen.

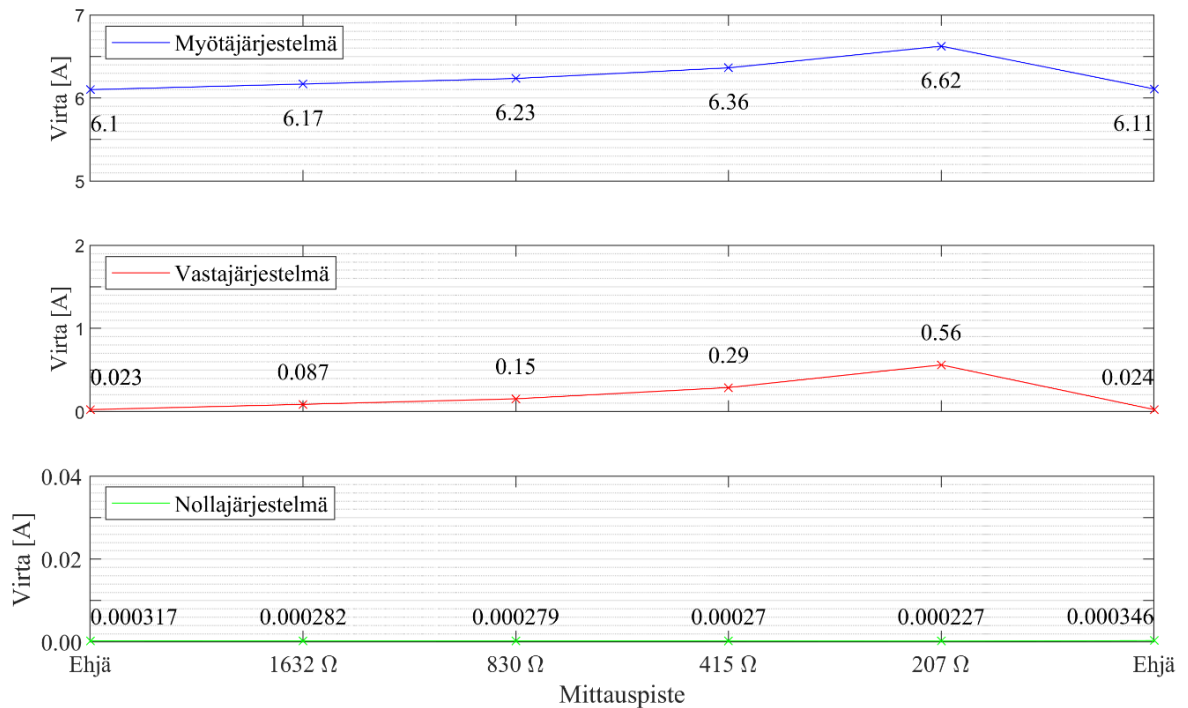
Kuvassa 3.14 on esitetty moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaajat niin ehjästä moottorista, kuin moottorista, jonka U-staattorikäämi ja W-staattorikäämi ovat kytkettynä toisiinsa 207Ω vikaresistanssin kautta 32. staattorikäämikierruksistaan, eli on aiheutettu staattorikäämien käämisulku. Kuvasta nähdään, että aaltomuodot muuttuvat ehjään moottoriin verrattuna. Vaiheiden 1 ja 3 virtojen amplitudit kasvavat huomattavasti, mutta vaiheen 2 virran amplitudi pysyy hyvin samana kuin ehjässä moottorissa.



Kuva 3.14. Moottorin vaihevirtojen aaltomuodot kaikista kolmesta vaiheesta. Vasemmalla puolella on ehjän moottorin vaihevirtojen kuvaaja ja oikealla puolella moottorin, johon on aikaansaatu staattorikäämien käämisulku 207Ω vikaresistanssin kautta. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

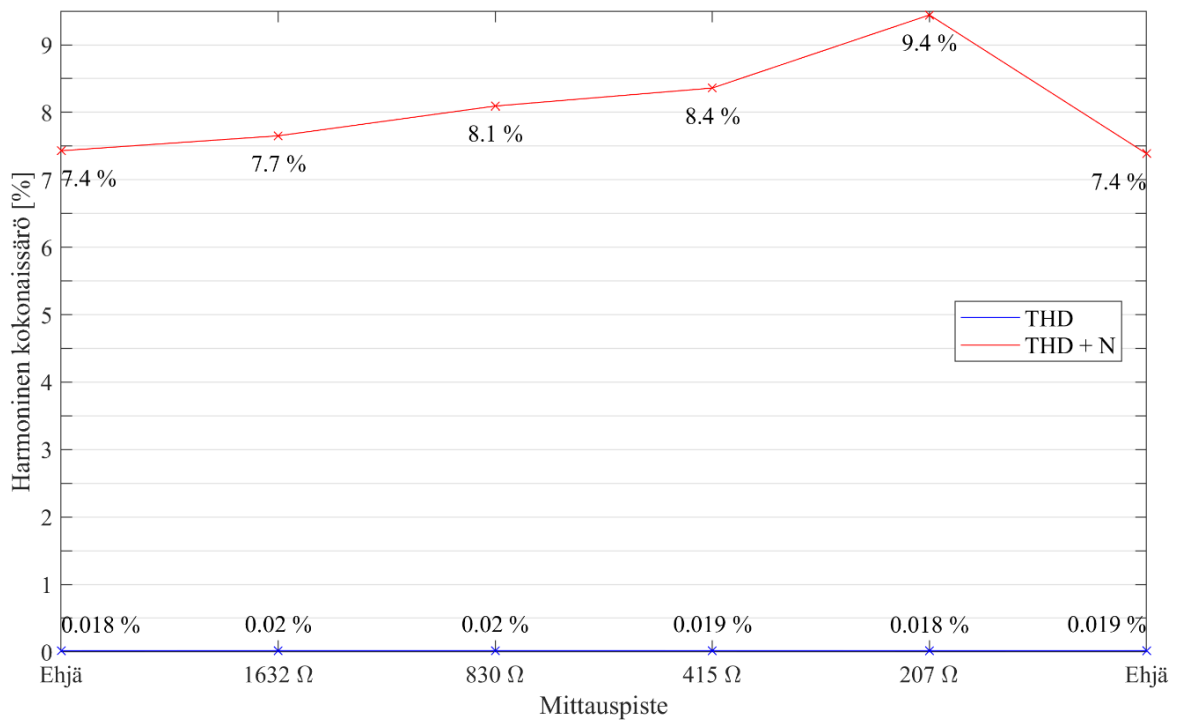
Kuvassa 3.15 on esitetty moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit moottorista, jossa staattorikäämin U 32. käämikierrös ja staattorikäämin W 32. käämikierrös ovat kytkettynä toisiinsa säätövastuksen kautta. Vertailun vuoksi kuvassa on myös arvot ehjästä

moottorista sekä ennen vian toteuttamista, että vian korjaamisen jälkeen. Kuvan perusteella voidaan sanoa, että sekä myötä- että vastakomponenttien arvot nousevat vian pahentuessa, eli vikaresistanssin pienentyessä.



Kuva 3.15. Moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit ehjästä moottorista, sekä moottorista, johon on toteutettu staattorikämmien käämisulkuvika. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvassa 3.16 on esitetty moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:n prosentuaalisia arvoja eri vikaresistansseilla moottorista, jossa on staattorikämmien välinen oikosulkuvika, sekä ehjästä moottorista sekä ennen vian aiheuttamista, että vian korjaamisen jälkeen.



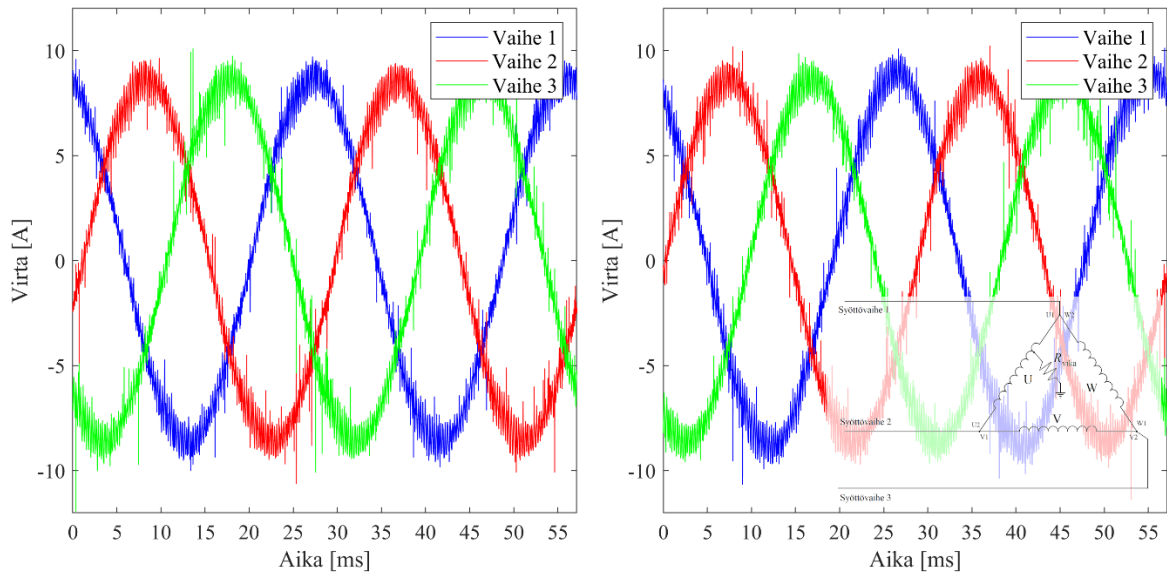
Kuva 3.16. Moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaaliset arvot ehjässä moottorissa, sekä moottorissa, johon on toteutettu staattorikäimien käämisulkuvika. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.16 nähdään, että moottorin vaihevirtojen THD:n prosentuaalinen arvo pysyy lähes muuttumattomana ja näin pienet muutokset voivat myös johtua muista tekijöistä kuin viasta. Moottorin vaihevirtojen THD+N:n prosentuaalinen arvo nousee kahdella prosenttiyksiköllä vakavimman vian, eli 207 Ω vikaresistanssin tapauksessa.

3.2.3 Staattorikäimin maasulku

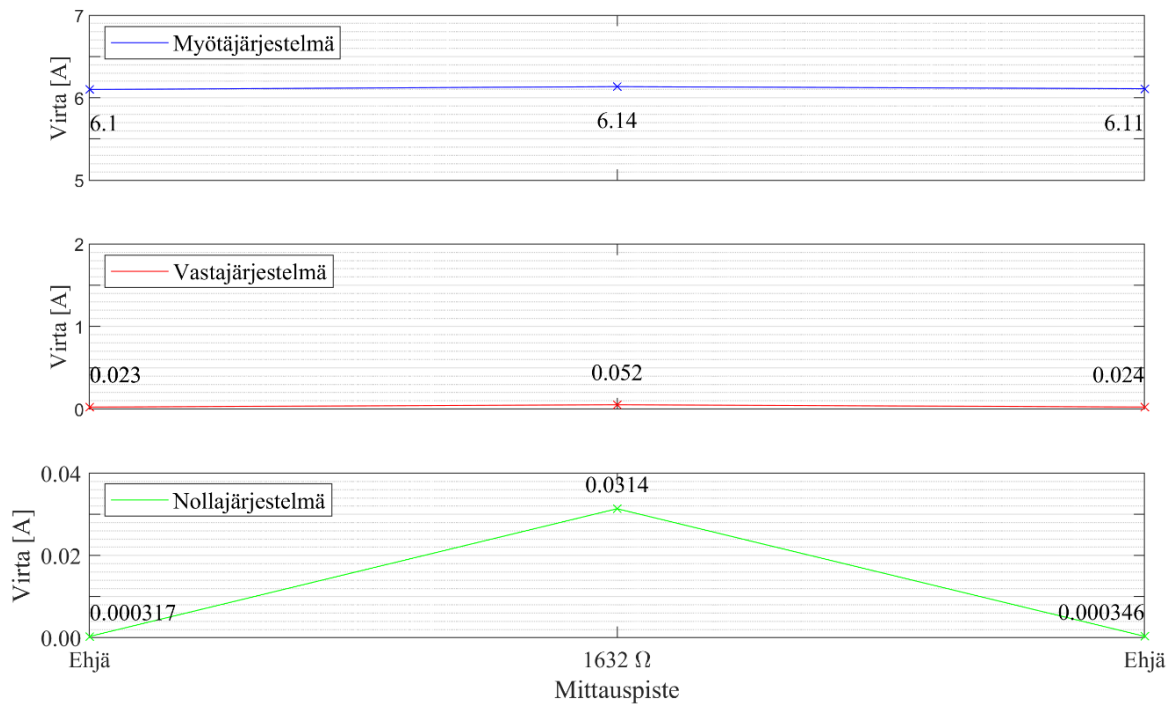
Staattorikäimin maasulku, eli vaiheen oikosulkeutuminen maahan, toteutettiin kytkemällä yksi staattorikäimi maahan vikavastuksen kautta kuvan 2.9 mukaisella tavalla. Staattorikäimi U yhdistettiin 32. käämikierroksesta säätövastuksen kautta maapotentiaaliin. Säätövastuksen resistanssiksi valittiin 1632 Ω. Vastuksen arvo on huomattavan suuri verrattuna staattorikäimin virtapiiriin DC-resistanssiin 4,13 Ω, sillä vikavirran ei haluttu olevan niin suuri, että se vahingoittaisi laitteistoa lopullisesti. Lisäksi vian indikaattorit havaittiin selvästi suurellakin resistanssilla ja vika on luonteeltaan sellainen, että vika on seurauksiltaan sitä suurempi, mitä pienempi vikaresistanssi on.

Kuvassa 3.17 on esitetty moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaajat ehjästä moottorista, sekä moottorista, jossa on staattorikäänin maasulkuvika 1632Ω vikaresistanssilla. Kuvasta nähdään, että vaihevirtojen aaltomuodot eivät juuri lainkaan muuttuneet ehjän moottorin vaihevirtojen aaltomuotoihin verrattuna.



Kuva 3.17. Moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaajat ehjän moottorin (vasemmalla) ja staattorikäänin maasulkuvikaisen moottorin (oikealla) tapauksessa. Kuvasta nähdään, että vaihevirtojen aaltomuodoissa ei tapahtunut suuria muutoksia. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

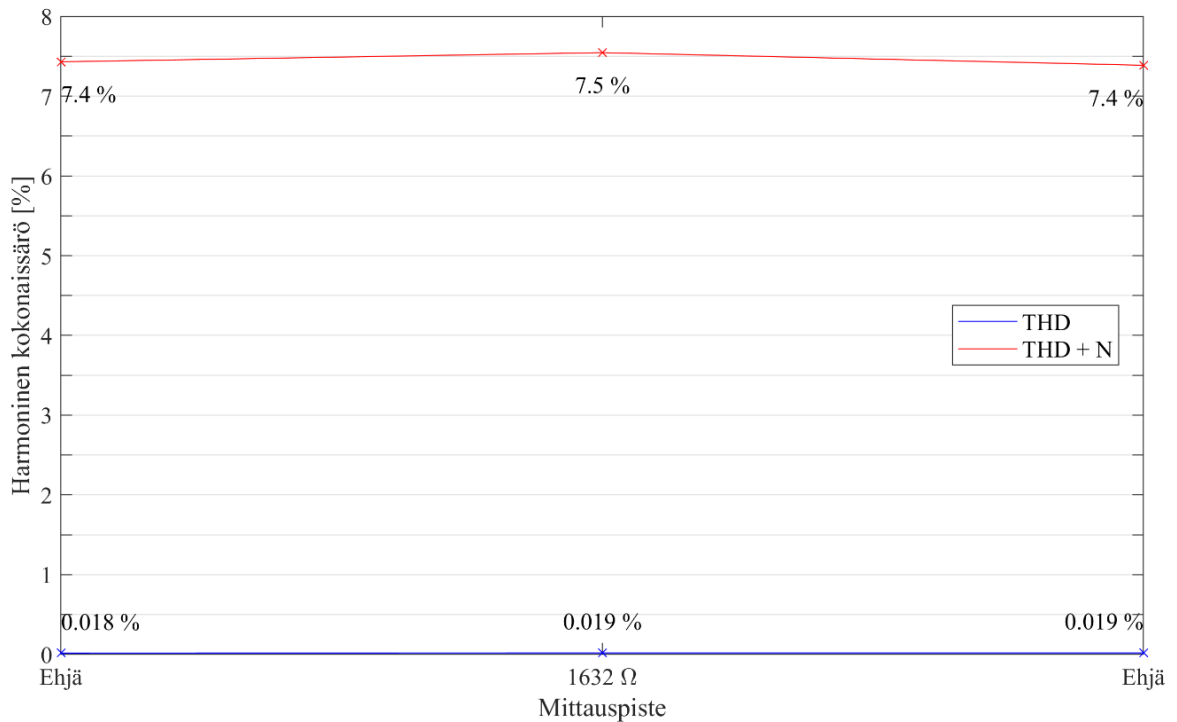
Kuvassa 3.18 on esitetty moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit moottorista, jossa staattorikäänissä U 32. käämikiertös on maasulussa säätövastuksen kautta. Vertailun vuoksi kuvassa on myös arvot ehjästä moottorista sekä ennen vian toteuttamista, että vian poistamisen jälkeen.



Kuva 3.18. Moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit ehjässä moottorissa, sekä moottorissa, jossa on toteutettuna staattorikäänin maasulkuvika vikaresistanssin kautta. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.18 käy ilmi, että vika nosti moottorin vaihevirtojen nollakomponentin arvoa huomattavasti. Arvo on lähes satakertainen verrattuna ehjän moottorin vaihevirtojen nollakomponenttien arvoihin. Myös virtojen vastakomponentin arvo on noussut jopa kaksinkertaiseksi verrattuna ehjän moottorin vastakomponentin arvoon, kun taas myötäkomponentin arvo ei juurikaan muuttunut vian vaikutuksesta.

Kuvassa 3.19 on esitetty moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:n prosentuaaliset arvot moottorista, jossa on staattorikäänin maasulkuvika vikaresistanssilla 1632 Ω. Vertailun vuoksi arvot on esitetty myös ehjästä moottorista sekä ennen vian aiheuttamista, että vian poistamisen jälkeen.



Kuva 3.19. Moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:n arvot ehjässä moottorissa, sekä moottorissa, jossa on toteutettuna staattorikäämin maasulkuvika. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.19 nähdään että staattorikäämin ja maapotentiaalivälinen oikosulkuvika ei juurikaan aiheuttanut muutoksia moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än prosentuaalisissa arvoissa.

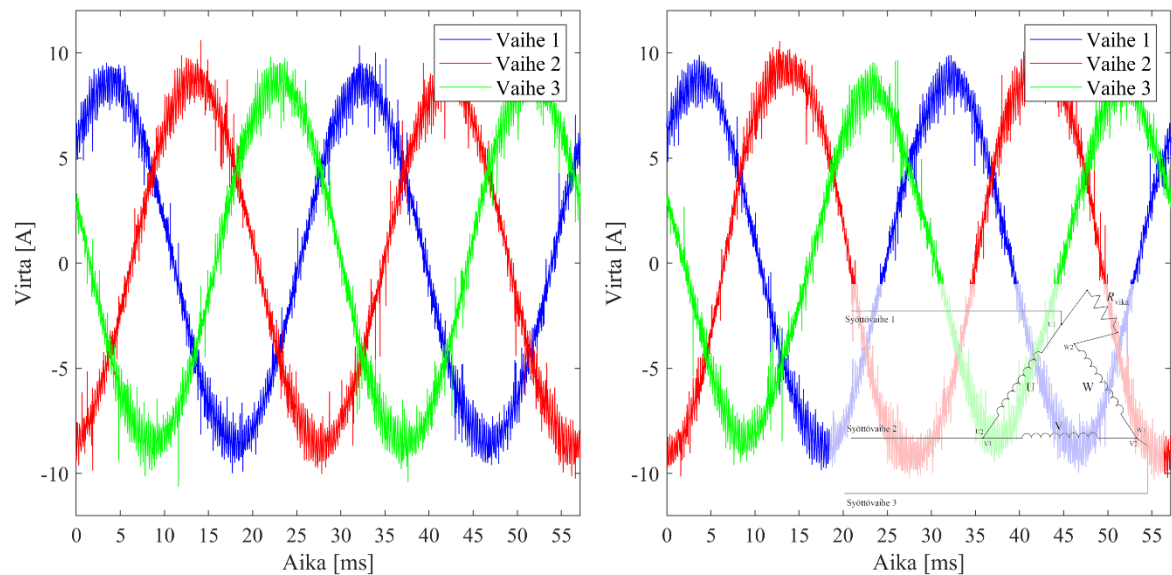
3.2.4 Moottorin epäsymmetriavika

Moottorin epäsymmetriavika toteutettiin kytkemällä säätövastus sarjaan staattorikäämin W kanssa. Vastus liitettiin syöttökaapelin ja staattorikäämin väliin. Kytkentä on esitetty kuvassa 2.12. Tämä aiheutettu vika lisää staattoriin epätasapainoa, sillä yhdellä staattorikäämällä on enemmän resistanssia kuin toisilla. Mitä suurempi resistanssi on, sitä suurempaa on epätasapainokin.

Säätövastuksen avulla voitiin kokeilla useita eri vikaresistanssin arvoja. Käytetyt resistanssit olivat 0,5 Ω, 1 Ω, 2 Ω, 4 Ω ja 8 Ω. Resistanssin arvot ovat samaa luokkaa kuin mitä käytettiin epäsymmetrisen syötön tapauksessa, sillä viat ovat luonteeltaan hyvin samanlaisia. Kun

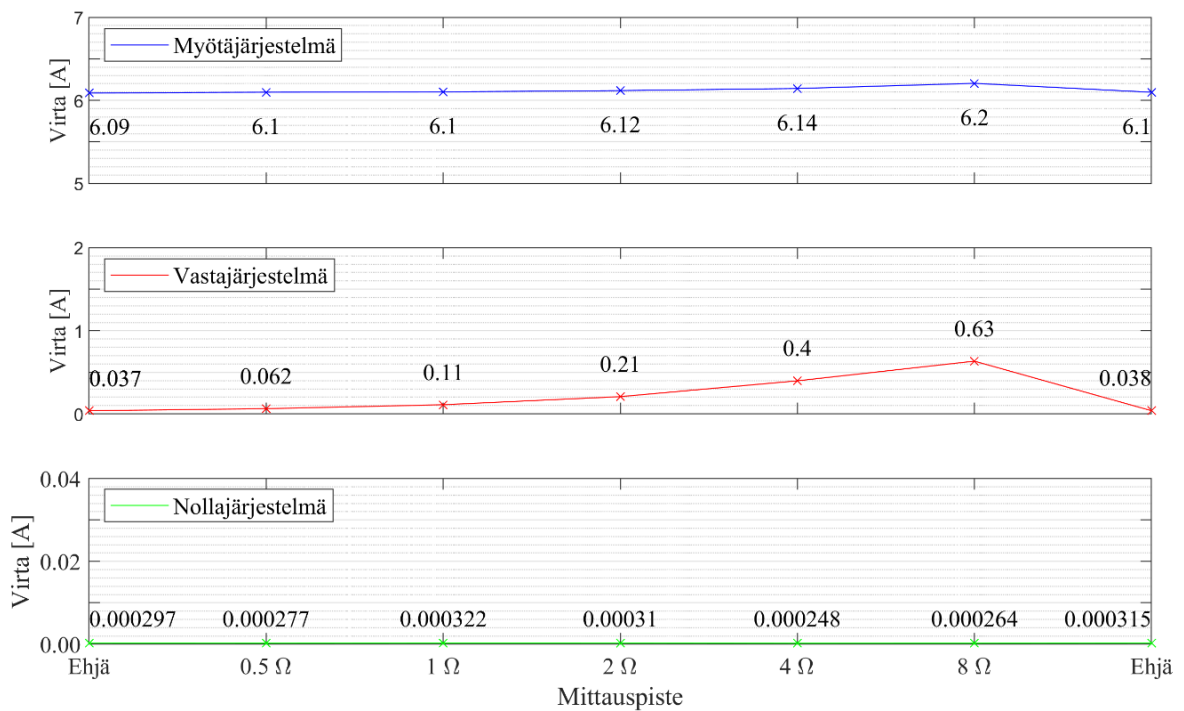
moottorin staattoriin DC-resistanssi on $4,13 \Omega$, näillä resistanssin arvoilla saadaan aikaiseksi sekä suurta, että pientä epätasapainoa.

Kuvassa 3.20 on esitetty kaikkien moottorin vaiheiden virtojen aaltomuodot ehjälle moottorille ja moottorille, jossa on moottorin epäsymmetriavika. Kuvassa esitetyssä tapauksessa on käytetty vikaresistanssia 8Ω , sillä tämä aiheutti mittauksissa käytetyistä vikaresistansseista vakavimman vian. Kuvasta nähdään, että vaiheen 2 amplitudi on hiukan suurempi kuin vaiheiden 1 ja 3.



Kuva 3.20. Moottorin vaihevirtojen aaltomuodot kaikista kolmesta vaiheesta. Vasemmalla puolella on ehjän moottorin vaihevirtojen kuvaaja ja oikealla puolella moottorin, johon on aikaansaatua moottorin epäsymmetriavika 8Ω vikaresistanssilla. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

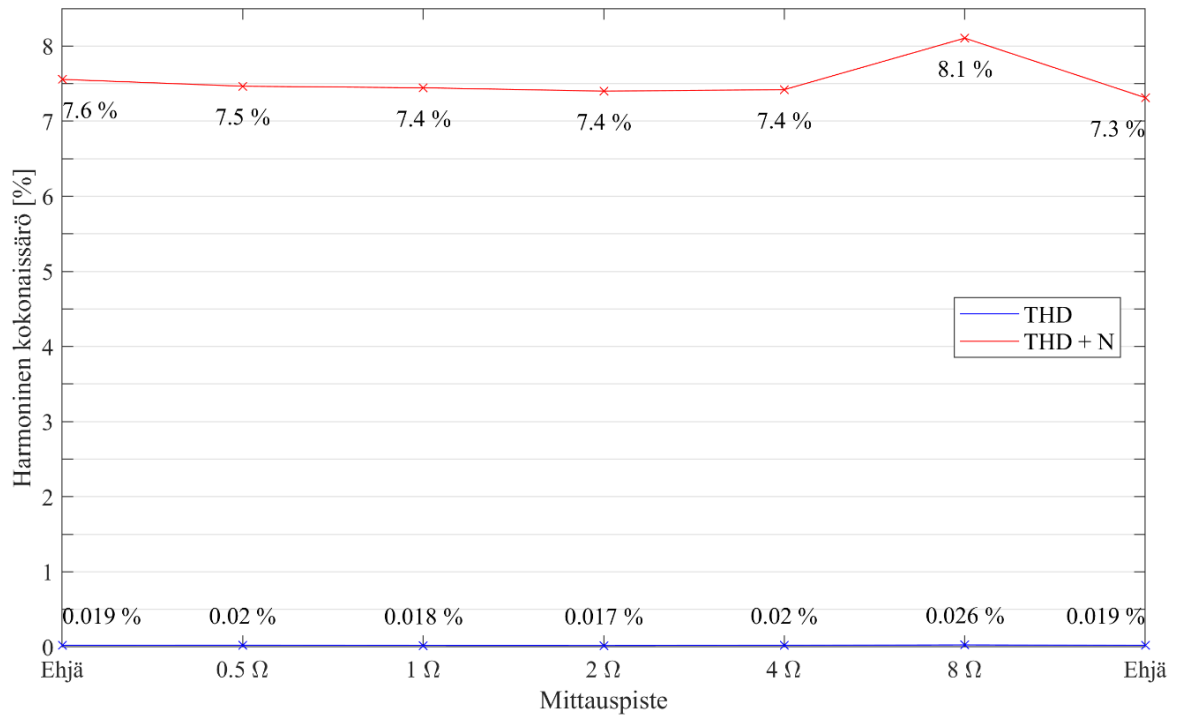
Kuvassa 3.21 on esitetty moottorin, johon on tehty sähköisiä epätasapainovikoja, vaihevirtojen symmetriset komponentit. Vertailun vuoksi mukana on myös ehjän moottorin arvot sekä ennen vikaa, että vian poistamisen jälkeen.



Kuva 3.21. Moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit ehjästä moottorista, sekä moottorista, johon on toteutettu moottorin epäsymmetriavika eri vikaresistansseilla. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.21 nähdään selvästi, että syötön epäsymmetrian kasvaessa moottorin vaihevirtojen symmetristen komponenttien vastakomponentin amplitudi kasvaa. Kun säätövastuksen resistanssi on säädetty 8 Ω:iin, on virtojen vastakomponentin amplitudi jo lähes kaksikymmenkertaisesti kasvanut. Myös myötäkomponentin amplitudi kasvaa, mutta paljon vähemmän kuin vastakomponentin.

Kuvassa 3.22 on esitetty moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:n prosentuaaliset arvot sähköisille epätasapainoille eri vikaresistansseilla. Vertailun vuoksi kuvassa on esitetty samat arvot myös ehjällä moottorilla sekä ennen vian toteuttamista, että sen poiston jälkeen.



Kuva 3.22. Moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än arvot ehjässä moottorissa, sekä moottorissa, johon on toteutettu moottorin epäsymmetriavika. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.22 nähdään, että sekä moottorin vaihevirtojen THD:n että THD+N:än prosentuaaliset arvot ovat nousseet vikaresistanssin ollessa 8 Ω, jolloin vika on selvästi pahimmillaan. Ehjänkin moottorin mittauspisteiden välillä on eroa vaihevirtojen THD+N:n arvoissa kolmen prosenttiyksikön kymmenyksen verran.

3.2.5 Staattorivikojen indikaattoreiden yhteenveto

Eri staattorivikojen vikaindikaattoreita taulukoitiin taulukkoon 3.3. Taulukkoon valittiin mittaustulosten perusteella hyväksi havaittuja indikaattoreita.

Taulukko 3.3. Mittaustulosten perusteella hyväksi todettuja staattorivikojen vikaindikaattoreita. Staattorikäämien kierrossulku viittaa oikeaan vikaan, eikä emuloituun.

Vika	Vikaindikaattorit
Staattorikäämien kierrossulku	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetrisien myötä- ja vastakomponenttien arvot kasvavat. Pahimman toteutetun vian (W 2Ω) tapauksessa myötäkomponentin arvo nousi noin 8,4 % ja vastakomponentin arvo 20-kertaistui.
Staattorikäämien käämisulku	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetrisien myötä- ja vastakomponenttien arvot kasvavat. Pahimman toteutetun vian (207Ω) tapauksessa myötäkomponentin arvo nousi noin 8,5 % ja vastakomponentin arvo yli 24-kertaistui.
Staattorikäämin maasulku	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetrisen nollakomponentin arvo kasvaa. Ainoan toteutetun vian (1632Ω) tapauksessa nollakomponentin arvo 99-kertaistui.
Moottorin epäsymmetriavika	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetrisien myötä- ja vastakomponenttien arvot kasvavat. Pahimman toteutetun vian (8Ω) tapauksessa myötäkomponentin arvo nousi noin 1,8 % ja vastakomponentin arvo 17-kertaistui.

Taulukon 3.3 perusteella voidaan vetää johtopäätös, että yleisesti ottaen moottorin vaihevirtojen symmetriset komponentit ovat hyvä indikaattori sille, että moottorin staattori on viallinen tai vikaantumassa. Toisaalta taas staattorikäämin maasulkua lukuun ottamatta viat antavat samoja tai hyvin samankaltaisia indikaatioita olemassaolostaan, jolloin eri vikojen tunnistaminen toisistaan on hyvin hankalaa.

3.3 Roottorisauvaviat

Roottorin sauvavika luotiin poraamalla reikä roottoriin. Reikä porattiin roottorin pituussuunnaisesti keskelle ja sivuttaissuunnassa yhden roottorisauvan keskikohtaan. 16 mm pitkä reikä 2 millimetrin halkaisijalla porattiin ensin koko roottorisauvan läpi, jolloin jäljelle jäi kapeimmalta kohdaltaan noin 45 % sauvan poikkipinta-alasta. Sitten reikää kasvatettiin 9:än millimetrin syvyyteen asti siten, että sen halkaisija oli 6 millimetriä, mikä riittää poistamaan koko roottorisauvan reiän syvyyteen asti. Tällöin poikkipinta-alaa oli jäljellä kapeimmassa kohdassa sauvaa enää 10 %. Lopuksi koko reiän halkaisija kasvatettiin 6 millimetriin koko 16 millimetrin syvyydeltä, mikä katkaisi roottorisauvan kokonaan.

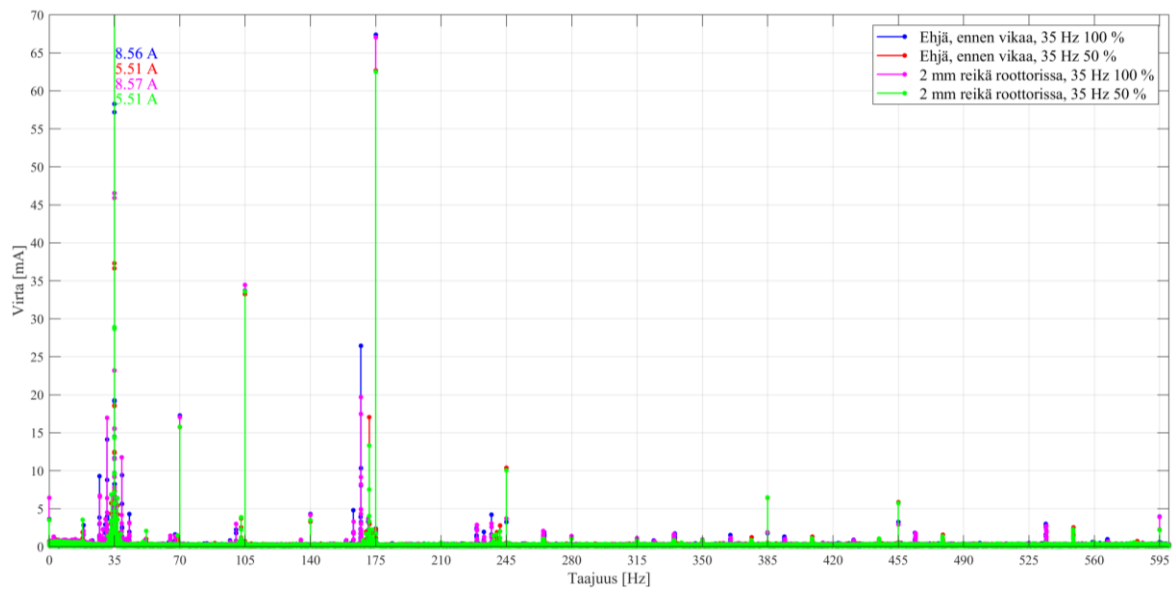
Yhtälön 2.1 avulla laskettu jättämä ehjällä moottorilla oli 35 Hz vaihevirtojen päätaajuudella ja 100 % kuormalla ajatussa ajossa keskimäärin 5,71 %, 35 Hz vaihevirtojen päätaajuudella ja 50 % kuormalla 2,44 % ja 50 Hz vaihevirtojen päätaajuudella ja 100 % kuormalla 3,91 %.

Yhtälön 2.6 avulla voidaan laskea roottorivian aiheuttamien virran yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia. Kun virtaa analysoidaan taajuustasossa, pitäisi roottorisauvavikaisessa koneessa näillä taajuuksilla esiintyä suurempi amplitudisia yliaaltokomponentteja, kuin ehjässä moottorissa. Jättämän arvoina on käytetty ehjän moottorin keskiarvojättämää kussakin toimintapisteessä, joten lasketut arvot eivät ole absoluuttisen tarkkoja. Taulukossa 3.4 on näitä laskettuja taajuuksia lähellä syöttötaajuutta kolmessa eri toimintapisteessä.

Taulukko 3.4. Roottorisauvavikojen laskennallisia virran yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia eri positiivisen kokonaisluvun k arvoilla. Arvot on esitetty kolmessa eri toimintapisteessä.

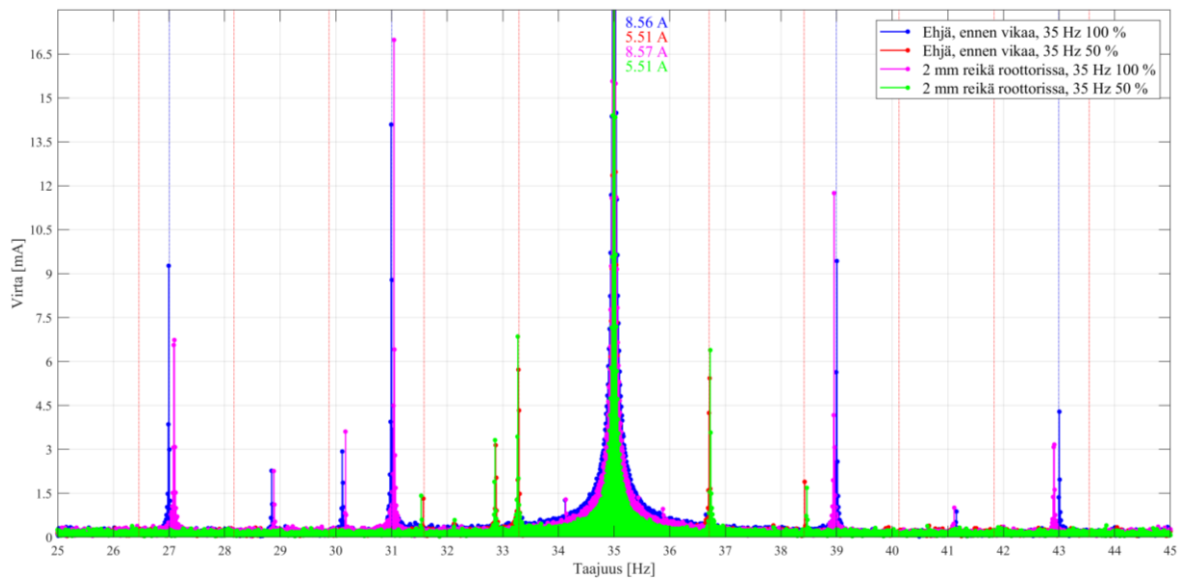
Toimintapiste	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$
35 Hz 100 %	31,003 Hz	27,006 Hz	23,009 Hz	19,012 Hz
	38,997 Hz	42,994 Hz	46,991 Hz	50,988 Hz
35 Hz 50 %	33,292 Hz	31,584 Hz	29,876 Hz	28,168 Hz
	36,708 Hz	38,416 Hz	40,124 Hz	41,832 Hz
50 Hz 100 %	46,090 Hz	42,180 Hz	38,270 Hz	34,360 Hz
	53,910 Hz	57,820 Hz	61,730 Hz	65,640 Hz

Virran mittausdatalle tehtiin FFT-muunnos aikatasosta taajuustasoon, jotta moottorin vaihevirtojen yliaaltokomponentteja voitaisiin helpommin analysoida. Kuvassa 3.23 on esitetty kahdessa eri toimintapisteessä ehjän moottorin ja roottorivikaisen moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentteja taajuuksilla 0 Hz ... 600 Hz. Kuvassa 3.24 puolestaan on sama esitetty taajuusalueella 25 Hz ... 45 Hz. Jälkimmäiseen kuvaan on myös merkitty taulukon 3.4 arvoja eri värisin katkoviivoin.



Kuva 3.23. Virran taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 600 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauvaan on porattu reikä 2 mm halkaisijalla. Toimintapisteinä ovat 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma sekä 35 Hz syöttötaajuus ja 50 % kuorma.

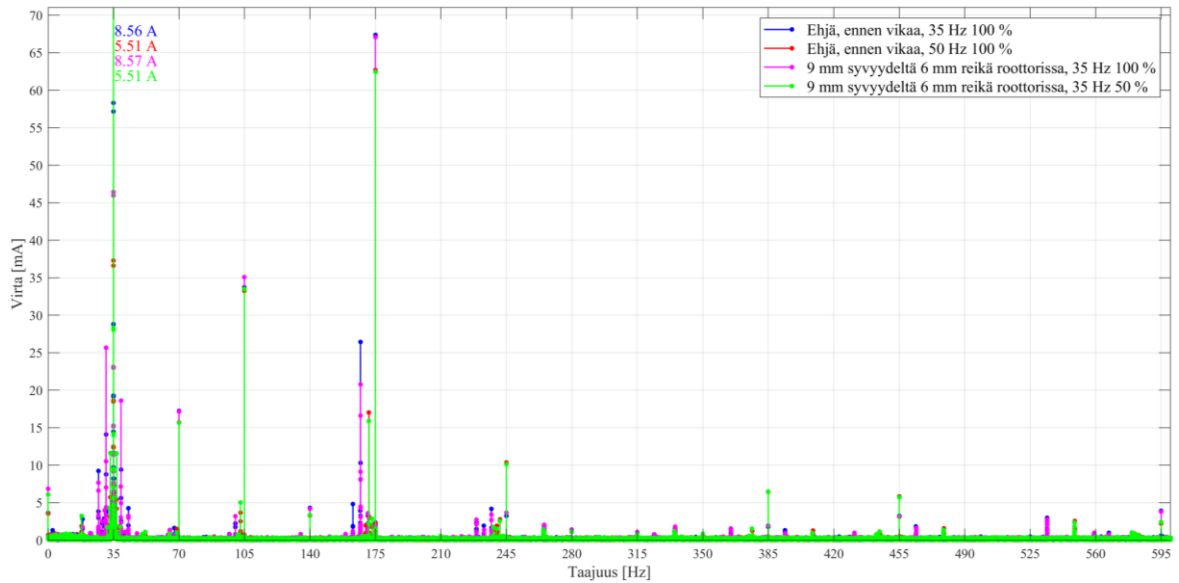
Kuvasta 3.23 nähdään, että roottorisauvaan porattu halkaisijaltaan 2 mm reikä vaikuttaa kaikissa toimintapisteissä virran yliaaltokomponenttien amplitudeihin. Kuvasta erottuu käytetty pääsyöttötaajuus 35 Hz, jonka kohdalla virtakomponenttien amplitudien huippuarvot eivät ole mahtuneet kuvaan, vaan niiden amplitudit on merkitty kuvaan lukuarvoina.



Kuva 3.24. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 25 Hz ... 45 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauvaan on porattu reikä 2 mm halkaisijalla. Toimintapisteinä ovat 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma, sekä 35 Hz syöttötaajuus ja 50 % kuorma. Katkoviivoilla on merkitty taulukon 3.4 arvoja niin, että siniset viivat ovat toimintapisteestä 35 Hz ja 100 % ja punaiset ovat toimintapisteestä 35 Hz 50 %.

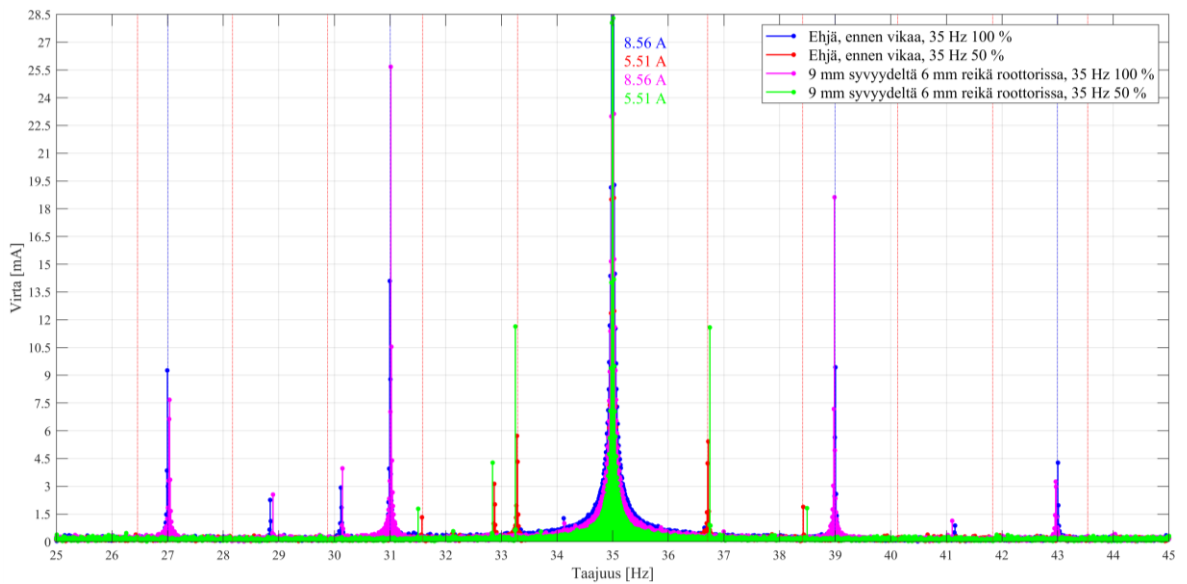
Kuvasta 3.24 voidaan nähdä, että taulukon 3.4 mukaisien taajuuksien kohdalla amplitudien nousua on selvästi havaittavissa reiän poraamisen jälkeen. Erityisen hyvin tämä näkyy mm. taajuuksilla 31 Hz ja 39 Hz toimintapisteessä 35 Hz 100 %, sekä taajuuksilla 33,3 Hz ja 36,7 Hz toimintapisteessä 35 Hz 50 %.

Kuvissa 3.25 ja 3.26 on esitetty kuvaajat, joissa on nähtävissä kahdessa toimintapisteessä ehjän, sekä roottorivikaisen moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit. Viallisen moottorin roottorisauvaan poratun reiän halkaisijaa on ensimmäisen 9 millimetrin matkalta kasvatettu 2 millimetristä 6 millimetriin. Kuvassa 3.25 on nähtävissä taajuusalue 0 Hz ... 600 Hz, kun taas kuvassa 3.26 on nähtävissä taajuusalue 25 Hz ... 45 Hz. Jälkimmäiseen on myös merkitty taulukon 3.4 taajuuksia eri värisillä katkoviivoilla.



Kuva 3.25. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 600 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauvaan on porattu reikä 2 millimetrin halkaisijalla, jota on 9 millimetrin syvyydeltä laajennettu 6 millimetriin. Toimintapisteinä ovat 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma, sekä 35 Hz syöttötaajuus ja 50 % kuorma.

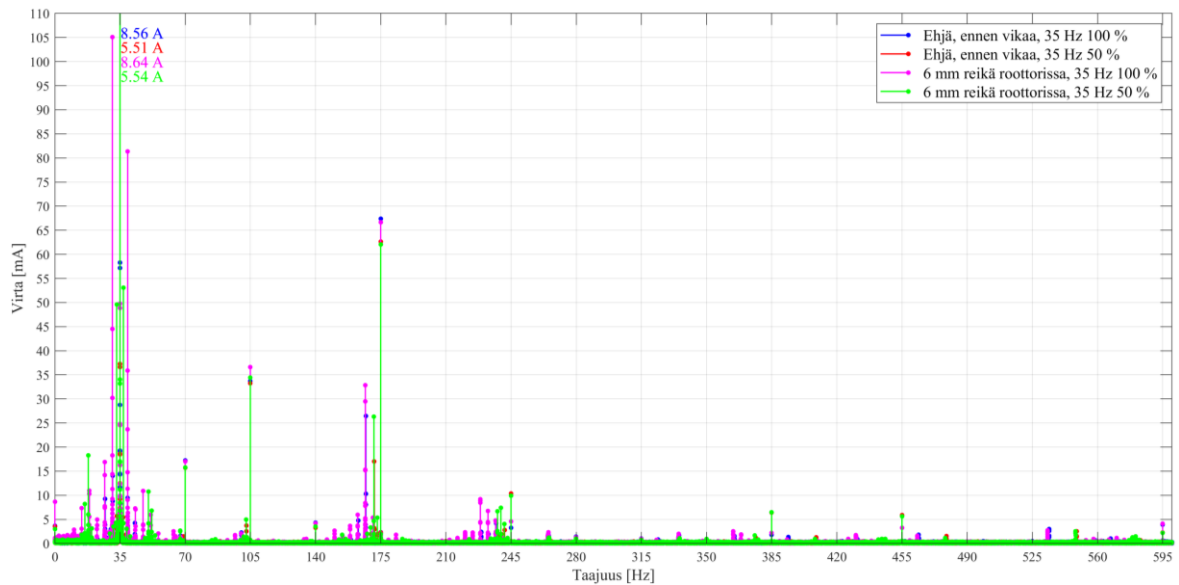
Kuvasta 3.25 nähdään, että samojen kuvassa 3.23 näkyvien taajuuksien amplitudit ovat kasvaneet entisestään sen jälkeen, kun reiän halkaisijaa on kasvatettu. Tämä on selvästi nähtävissä mm. toimintapisteessä 35 Hz 100 % taajuudella 31 Hz, sillä reiän suurentuessa virtakomponentin arvo on noussut n. 14 mA:sta lähes 26 milliampeeriin. Yliaaltokomponenttien amplitudit niillä taajuuksilla, jotka indikoivat vikaa, ovat kasvaneet. Tämä oli oletettavissa, sillä entistä enemmän roottorisauvan materiaalia on porattu pois roottorisauvasta.



Kuva 3.26. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 25 Hz ... 45 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauvaan on porattu reikä 2 millimetrin halkaisijalla, jota on 9 millimetrin syvyydeltä laajennettu 6 millimetriin. Toimintapisteinä ovat 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma, sekä 35 Hz syöttötaajuus ja 50 % kuorma. Katkoviivoilla on merkitty taulukon 3.4 arvoja niin, että sininen on toimintapisteestä 35 Hz ja 100 % ja punainen on toimintapisteestä 35 Hz 50 %.

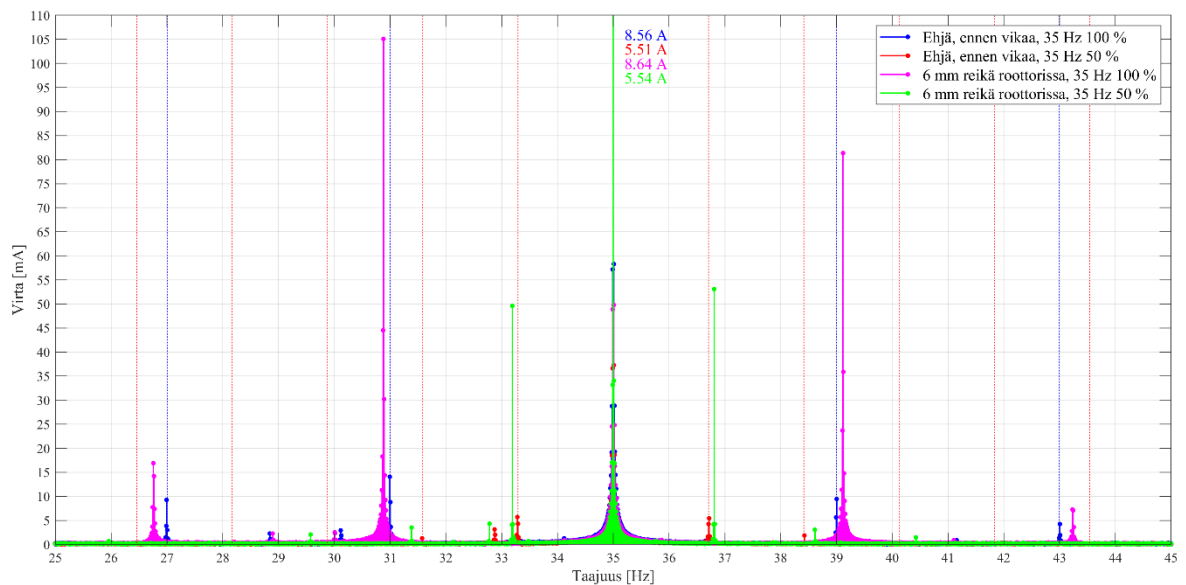
Kuvasta 3.26 voidaan nähdä, että taulukon 3.4 mukaisien taajuuksien kohdalla amplitudien nousua on selvästi havaittavissa reiän laajennusporauksen jälkeen. Erityisen hyvin tämä näkyy edelleenkin mm. taajuuksilla 38,9 Hz ja 39,1 Hz toimintapisteessä 35 Hz 100 % ja taajuuksilla 33,2 Hz ja 36,8 Hz toimintapisteessä 35 Hz 50 %.

Kuvissa 3.27 ja 3.28 on esitetty kuvaajat, joissa on nähtävissä kahdessa toimintapisteessä ehjän, sekä roottorivikaisen moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit. Viallisen moottorin roottorisauvaan poratun reiän halkaisijaa on kasvatettu 2 millimetristä 6 millimetriin, jolloin koko sauva on reiän kohdalta poikki. Kuvassa 3.27 on nähtävissä taajuusalue 0 Hz ... 600 Hz, kun taas kuvassa 3.28 on nähtävissä taajuusalue 25 Hz ... 45 Hz. Jälkimmäiseen on myös merkitty taulukon 3.4 taajuuksia eri värisillä katkoviivoilla.



Kuva 3.27. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 600 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauva on porattu kokonaan poikki. Toimintapisteinä ovat 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma, sekä 35 Hz syöttötaajuus ja 50 % kuorma.

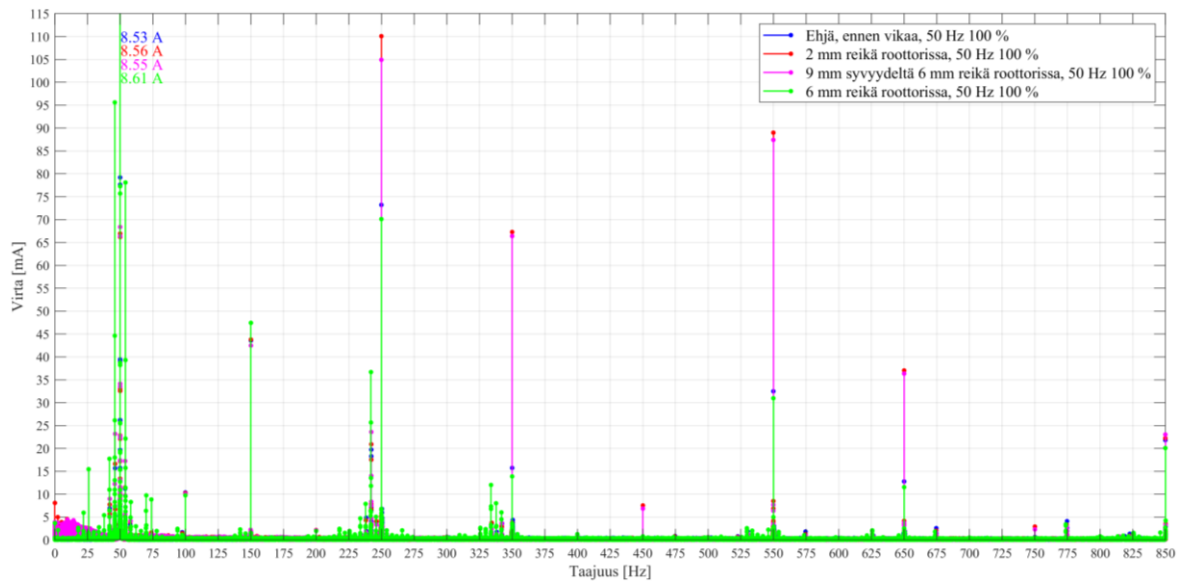
Kuvasta 3.27 voidaan nähdä, että kun roottorisauvan reiän halkaisijaa on kasvatettu 6 millimetriin, on varsinkin päätaajuuksien sivunauhojen amplitudit kasvaneet huomattavasti. Esimerkiksi toimintapisteen 35 Hz 100 % taajuuksilla 31 Hz ja 39 Hz on amplitudi muuttunut hiukan vajaasta 15 milliampeerista noin 105 milliampeeriin ja 10 milliampeerista noin 81 milliampeeriin edelliseen mittauspisteeseen verrattuna. Toimintapisteen 35 Hz 50 % yliaaltokomponenttien amplitudien muutokset taas puolestaan ovat olleet paljon pienempiä. Nämä näkyvät paremmin kuvassa 3.28.



Kuva 3.28. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 25 Hz ... 45 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauva on porattu kokonaan poikki. Katkoviivalla on merkitty taulukon 3.4 arvoja niin, että sininen on toimintapisteestä 35 Hz ja 100 % ja punainen on toimintapisteestä 35 Hz 50 %.

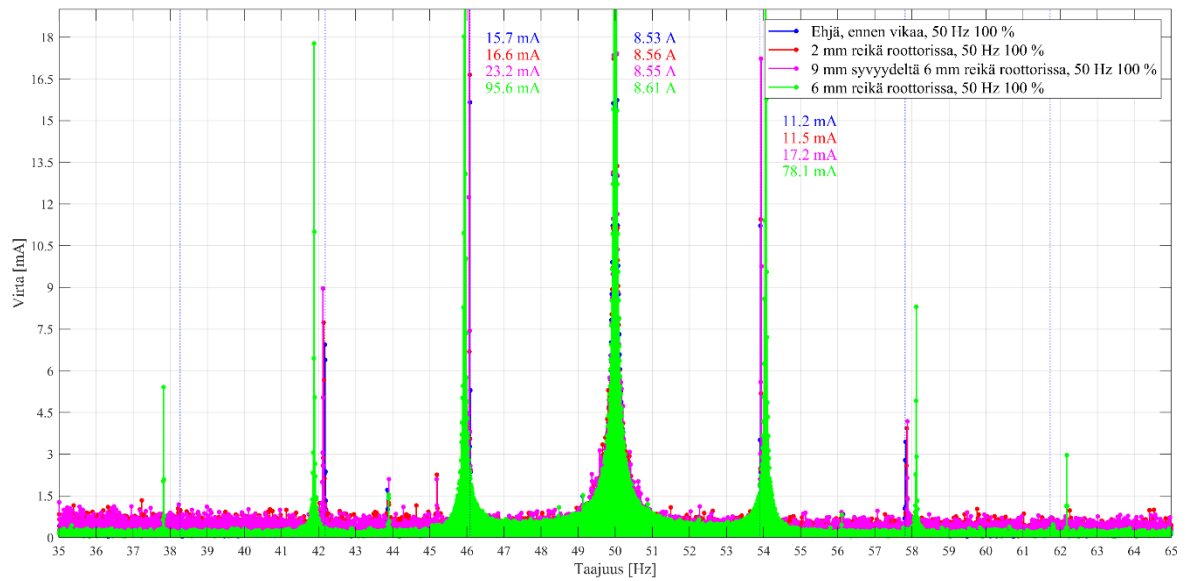
Kuvasta 3.28 voidaan nähdä, että vika on saanut myös toimintapisteessä 35 Hz 50 % muutoksia virtakomponentteihin aikaan. Esimerkiksi taajuudella noin 33,2 Hz on virtakomponentin amplitudi noussut noin 5,7 milliampeerista noin 49,6 milliampeeriin, eli lähes kymmenkertaistunut. Myös taajuudella 39,2 Hz on amplitudi noussut 5,4 milliampeerista 53,1 milliampeeriin.

Kuvissa 3.29 ja 3.30 on esitetty kuvaajat, joissa on nähtävissä toimintapisteessä 50 Hz 100 % ehjän, sekä roottorivikaisen moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit. Roottoriviat ovat samat kuin aiemmin muille toimintapisteille esitetyt viat. Kuvassa 3.29 on nähtävissä taajuusalue 0 Hz ... 850 Hz, kun taas kuvassa 3.30 on nähtävissä taajuusalue 25 Hz ... 45 Hz. Jälkimmäiseen on myös merkitty taulukon 3.4 taajuuksia katkoviivoilla.



Kuva 3.29. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 850 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauvaan on porattu reikä, jota on laajennettu kahdesti. Toimintapisteenä on 50 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

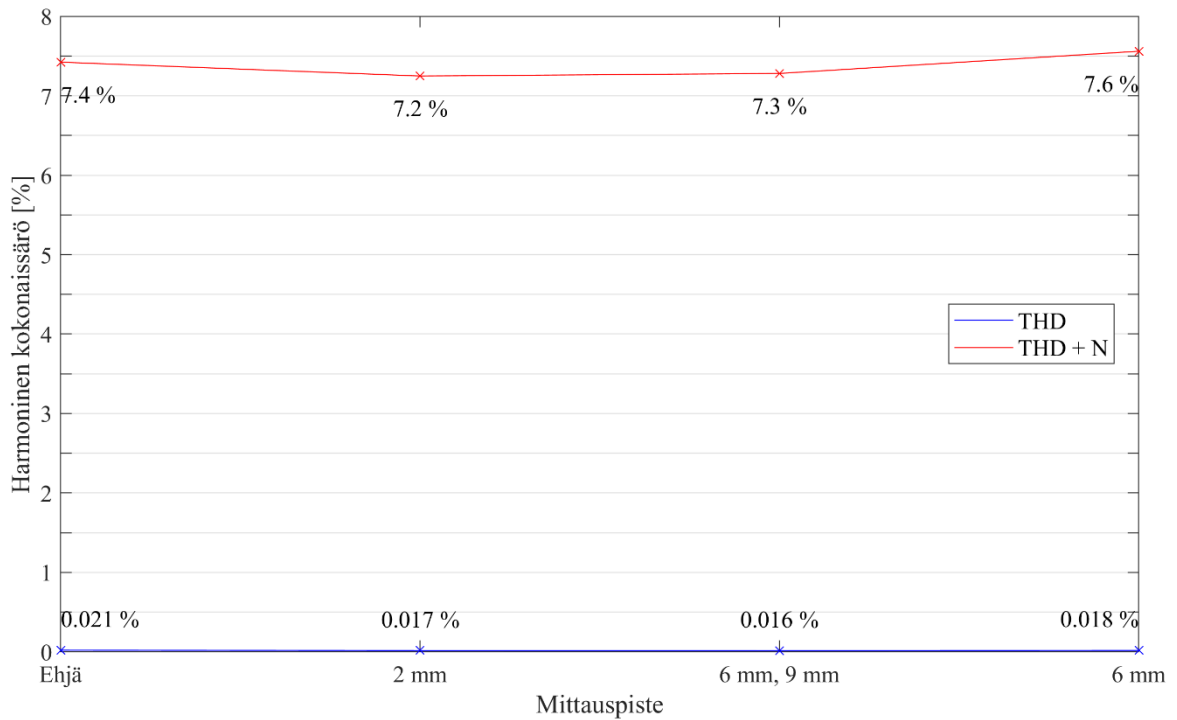
Kuvasta 3.29 voidaan nähdä, että suuria amplitudien muutoksia tapahtuu mm. taajuuksilla 250 Hz, 350 Hz, 550 Hz ja 650 Hz. Näissä amplitudit ovat nousseet noin 70 milliampeerista 110 milliampeeriin, noin 14 milliampeerista 67 milliampeeriin, 31 milliampeerista lähes 90 milliampeeriin ja noin 13 milliampeerista 36 milliampeeriin. Lisäksi 150 Hz taajuudella tapahtuu pienempiä muutoksia.



Kuva 3.30. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 25 Hz ... 45 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että roottorivikaisella moottorilla, jonka roottorisauvaan on porattu reikä, jota on laajennettu kahdesti. Sinisellä katkoviivalla on merkitty taulukon 3.4 arvoja toimintapisteessä 50 Hz 100 %.

Kuvasta 3.30 nähdään, että muuttuvien virtakomponenttien taajuudet mukailevat erittäin hyvin taulukkoon 3.4 laskettuja arvoja, vaikka syöttötaajuus onkin sama kuin verkon taajuus. Suurimmat muutokset nähdään taajuuksilla 46 Hz ja 54 Hz, joilla hypätään ehjän moottorin virtakomponenttien amplitudeista 15,7 mA ja 11,2 mA viallisen moottorin amplitudeihin 95,6 mA 78,1 mA, kun roottoriin poratun reiän halkaisija on 6 mm.

Kuvassa 3.31 on nähtävissä moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:n arvot sekä ehjästä moottorista, että roottorisauvavikaisesta moottorista. Eri vikoja on merkitty kuvaan roottorisauvaan poratun reiän halkaisijan mukaan. Poikkeuksena on 9 millimetrin pituudelta 6 millimetrin halkaisijan tapaus, joka on ilmoitettu sekä reiän halkaisijan, että pituuden, mukaan.



Kuva 3.31. Moottorin vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än arvot ehjässä moottorissa, sekä moottorissa, johon on toteutettu moottorin roottorisauvavika poraamalla eri kokoisia reikiä roottorisauvaan. 2 mm tarkoittaa, että reikään on porattu 2 mm halkaisijallinen ja 16 mm pitkä reikä, 6 mm, 9 mm tarkoittaa, että reikää on 9 mm pituudelta levennetty 6 millimetrin halkaisijalliseksi ja 6 mm tarkoittaa, että koko reikä on halkaisijaltaan 6 mm. Ehjä moottori on moottori, johon ei ole aiheutettu vielä mitään vikaa. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.31 nähdään, että moottorin vaihevirtojen THD:n arvon muutokset ovat vain prosenttiyksikön tuhannesosia, mutta virtojen THD+N:än muutokset ovat prosenttiyksikön kymmenesosia. Mielenkiintoista on se, että sekä roottorivikaisen moottorin vaihevirtojen THD:n että THD+N:än arvot pienenevät ehjän moottorin arvoihin verrattuna, paitsi THD+N kaikkein suurimman poratun reiän tapauksessa.

Tässä kappaleessa esitettyjen mittaustulosten perusteella roottorivikojen havainnointiin moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysi on toimiva menetelmä. Suhteellisen pienetkin reiät aiheuttavat muutoksia virtakomponenttien amplitudeihin laskettavissa olevilla taajuuksilla ja vian pahentuessa amplitudit nousevat entisestään, ja lisäksi kyseisten komponenttien

taajuus muuttuu sauvan ollessa kokonaan poikki. Virtojen THD:n arvot puolestaan pienenevät hiukan, kun roottoriin porattiin reikä.

Taulukossa 3.5 on esitetty mitatut moottorin jättämän arvot eri toimintapisteissä. Taulukon arvoista nähdään, että jättämä kasvaa vian pahentuessa muissa toimintapisteissä kuin 35 Hz 100 %, jossa pieni vika pienentää jättämää, mutta suurempi vika taas nostaa sitä pienempään vikaan nähden.

Taulukko 3.5. Mitatut jättämän arvot eri toimintapisteissä ehjällä moottorilla ja eri roottorivioilla.

	35 Hz 100 %	35 Hz 50 %	50 Hz 100 %
Ehjä moottori	5,71 %	2,44 %	3,91 %
2 mm reikä	5,64 %	2,47 %	3,92 %
9 mm, 6 mm reikä	5,68 %	2,49 %	3,93 %
6 mm reikä	5,88 %	2,58 %	4,05 %

Mittaustuloksien mukaan ehjä moottori oli ensimmäisten mittausten aikana noin 3,3 °C lämpimämpi, kuin vikojen toteutusten jälkeisten mittausten aikaan. Koska ympäristön lämpötila oli koko mittausjakson ajan sama, lämpötilaero todennäköisesti johtuu siitä, että moottori oli aivan uusi, eli se oli vielä sisäänajovaiheessa. Sisäänajon aikana moottorissa on voinut olla ylimääräisiä tehohäviöitä, mikä on johtanut hetkellisesti suurempaan jättämän arvoon. Uusintamittauksia ei voitu samalla moottorilla tehdä, koska yksi sen roottorisauvoista oli jo katkaistu.

Kuvista 3.24, 3.26, 3.28 ja 3.30 voidaan nähdä, että tiettyjen virtakomponenttien taajuudet ovat muuttuneet, joka näkyy näissä kuvissa näiden komponenttien siirtymisenä taajuustasossa eri vikapisteiden välillä. Jättämä vaikuttaa oikosulkumoottorissa staattorin ja roottorin väliseen vuorovaikutukseen ja taulukossa 3.5 esitettyjen arvojen mukaan jättämän arvot muuttuvatkin eri vikojen välillä. Mittauksissa mitattiin virtaa, joka kulkee staattorin virtapiirissä, joten jättämällä on vaikutusta siihen, millä taajuuksilla nämä roottorin vioista johtuvat virtakomponentit esiintyvät.

3.4 Laakeriviat

Laakereihin aiheutettiin mekaanisia vikoja poraamalla ja naarmuttamalla laakerin osia. Ensin laakerien ulommille kehille porattiin reikiä. Tuulettimen puoleisen laakerin ulkokehälle porattiin halkaisijaltaan 2,2 mm reikä, jota sitten kasvatettiin 3,2 millimetriin. Tämän jälkeen halkaisijaltaan 2,2 mm reikä porattiin käyttöakselin puoleiseen laakeriin, ja mittaukset suoritettiin eri tavoin siten, että ulkokehän reikä suunnattiin ylös, alas ja sivulle.

Moottorin laakereina käytettiin käyttöakselin puolella 6206-2Z/C3- tyyppin ja tuulettimen puolella 6205-2Z/C3-tyypin laakereita (kts. liite 2). Käytetyt laakerit olivat SKF:n, NSK:n sekä FAG:in valmistamia. SKF ei ilmoita kaikkia tarvittavia mittatietoja laakerien datalehdessä, mutta SKF:n verkkosivuilla on saatavissa CAD-mallit laakereista (SKF 2022a; SKF 2022b). Näistä CAD-malleista SolidWorks-ohjelmiston avulla mitattiin mallista mittoja, jotka on esitetty taulukossa 3.6.

Taulukko 3.6. SKF:n verkkosivuilta löytyneen CAD-mallin mukaisia mittoja laakereista (SKF 2022a; SKF 2022b). Näitä mittoja ei ole tarkistusmitattu halkaisemalla oikeita laakereita, joten ne voivat poiketa todellisista mitoista.

Suure	6206-2Z/C3	6205-2Z/C3
Vierintäelimien määrä	9 kpl	9 kpl
Vierintäelimien halkaisija	8,0 mm	7,5 mm
Vierintäelimien kulkureitin halkaisija	46,00 mm	39,04 mm

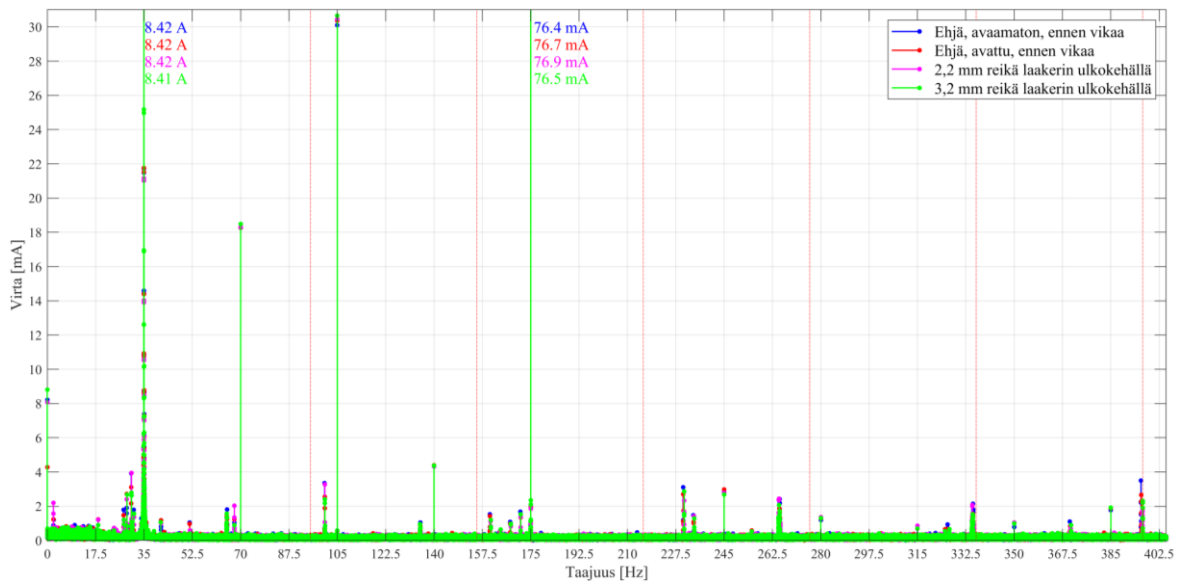
Taulukon 3.6 arvojen perusteella voidaan yhtälöiden 2.12 ja 2.13 avulla laskea moottorin vaihevirtojen yliaaltokomponenttien esiintymistaajuudet ulkokehän vioille ja sisäkehän vioille. Moottorin pyörimisnopeutena käytettiin ehjän moottorin mittausjakson keskiarvoa kullakin toimintapisteellä. Koska moottorin laakerit ovat urakuulalaakereita (SKF 2022a; SKF 2022b), laakerien kosketuskulmat ovat kuormaamattomina 0° (NSK Ltd 1989, A7 & A10). Lasketut taajuudet on esitetty taulukossa 3.7.

Taulukko 3.7. Yhtälöiden 2.12 ja 2.13 ja taulukon 3.6 arvojen avulla lasketut moottorin vaihevirtojen taajuudet, joilla yliaaltokomponentteja esiintyy. Teoriassa virrassa näiden yliaaltokomponenttien amplitudien pitäisi nousta.

Vika ja toimintapiste	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
Ulkokehä, 35 Hz 100 %	95,25 Hz	155,50 Hz	215,76 Hz	276,01 Hz	336,26 Hz
Sisäkehä, 35 Hz 100 %	123,91 Hz	212,82 Hz	301,72 Hz	390,63 Hz	479,54 Hz
Ulkokehä, 35 Hz 50 %	97,17 Hz	159,33 Hz	221,50 Hz	283,67 Hz	345,84 Hz
Sisäkehä 35 Hz 50 %	126,73 Hz	218,47 Hz	310,20 Hz	401,93 Hz	493,66 Hz
Ulkokehä, 50 Hz 100 %	137,60 Hz	225,19 Hz	312,79 Hz	400,39 Hz	487,99 Hz
Sisäkehä, 50 Hz 100 %	179,26 Hz	308,52 Hz	437,77 Hz	567,03 Hz	696,29 Hz

Kuvassa 3.32 on esitetty ehjän moottorin, sekä laakerivikaisen moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit. Ehjästä moottorista on nähtävissä kolme eri mittauspistettä, joista yksi on tehty ennen vian toteutusta, yksi on tehty ennen vian toteutusta, mutta laakerin pölysuojan poistamisen jälkeen, ja yksi vian poistamisen jälkeen.

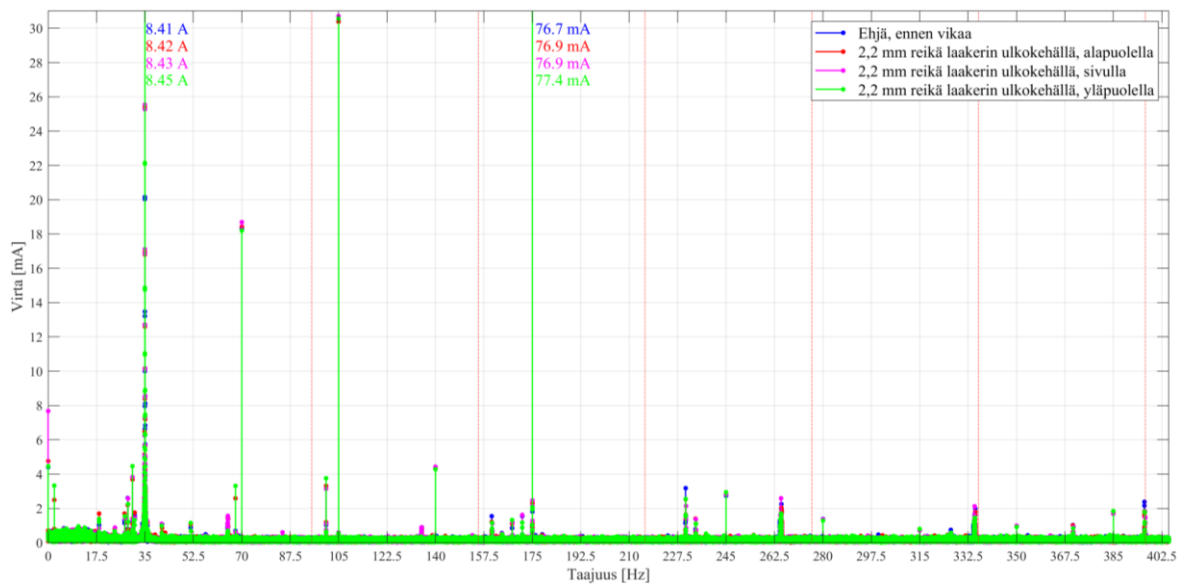
Viat toteutettiin poraamalla moottorin tuulettimen puoleiseen laakeriin ensin halkaisijaltaan 2,2 millimetrin reikä, ja sitten reikää kasvatettiin halkaisijaltaan 3,2 millimetriseksi. Kuvan 3.32 toimintapisteessä moottorin vaihevirtojen päätaajuus on 35 Hz ja kuormakoneen vääntöohjeena on 100 % moottorin vääntömomentista. Kuvaan on merkitty punaisiin katkovii-voin taulukossa 3.7 ilmoitettuja laakerin ulkokehän vikojen aiheuttamien yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia kuvassa esitettyssä toimintapisteessä.



Kuva 3.32. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 405 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että laakerivikaisella moottorilla, jonka tuulettimen puoleisen laakerin ulkokehälle on porattu ensin halkaisijaltaan 2,2 millimetrin reikä, jota on sitten porattu 3,2 millimetriseksi. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.32 nähdään, että lasketut taajuudet osuivat melko huonosti muuttuneiden virta-komponenttien taajuuksien kohdille, mikä voi johtua siitä, että laakerin osien mittoja arvioitiin CAD-mallien avulla, eikä oikeaa laakeria halkaisemalla. Muutoksia vikaantuneessa moottorissa ehjään verrattuna vaikuttaisi olevan lähinnä taajuuksilla n. 2 Hz ja 68 Hz, joissa viallisen moottorin amplitudit nousivat hiukan ehjän moottorin amplitudeihin verrattuna.

Kuvassa 3.33 on esitetty ehjän moottorin, sekä laakerivikaisen moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit. Ehjästä moottorista on nähtävissä kaksi eri mittauspistettä, joista toinen on tehty ennen vian toteutusta ja toinen vian poistamisen jälkeen. Vika toteutettiin poraamalla halkaisijaltaan 2,2 millimetrin reikä moottorin käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehälle. Laakeria käytettiin moottorissa kolmessa eri asennossa, jotka on jokainen merkitty omaksi mittauspisteekseen. Kuvaan on merkitty punaisiin katkoviivoihin taulukossa 3.7 ilmoitettuja laakerin ulkokehän vikojen aiheuttamien yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia kuvassa esitettyssä toimintapisteessä.



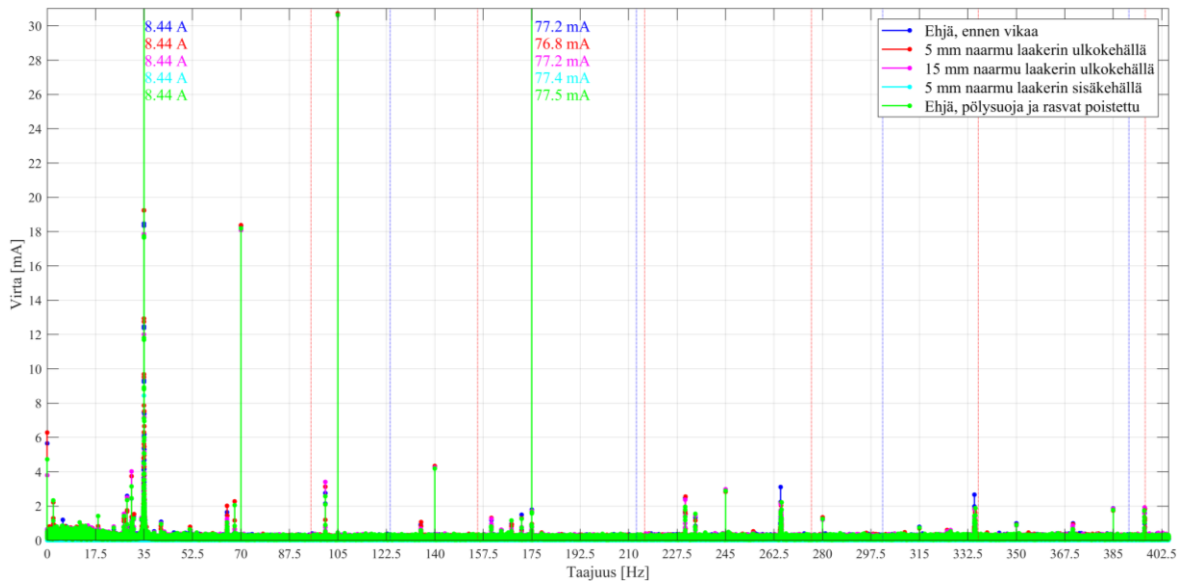
Kuva 3.33. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 405 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että laakerivikaisella moottorilla, jonka käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehälle on porattu halkaisijaltaan 2,2 millimetrin reikä. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.33 nähdään, että lasketut taajuudet osuivat suurelta osin semmoisille taajuuksille, joista on nähtävissä vain kohinaksi tulkittavia virtakomponentteja. Suuria muutoksia ei kuvan perusteella muutenkaan ollut, lähinnä tiettyjen taajuuskomponenttien amplitudit laskivat hiukan, kuten on nähtävissä mm. taajuudella 390 Hz. Lisäksi samoilla taajuuksilla tapahtui amplitudien muutoksia ehjään moottoriin verrattuna, kuin tuulettimen puoleisen laakerinkin kohdalla. Näitä taajuuksia olivat 2 Hz ja 68 Hz.

Kuvassa 3.34 on esitetty ehjän moottorin, sekä laakerivikaisen moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit. Ehjästä moottorista on nähtävissä kaksi eri mittauspistettä, joista toinen on tehty ennen vian toteutusta ja toinen on uusi laakeri, josta on poistettu sisältä rasvat ja pölysuojat. Kuvaan on merkitty sinisin katkoviivoin taulukossa 3.7 ilmoitettuja laakerin sisäkehän vikojen aiheuttamien yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia kuvassa esitetyssä toimintapisteessä ja punaisin katkoviivoin ulkokehän vikojen aiheuttamien yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia.

Kuvan 3.34 laakerivika toteutettiin naarmuttamalla laakerin ulko- ja sisäkehää vuorotellen. reikä moottorin käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehälle. Ensin tehtiin naarmuja 5

millimetrin pituiselle alueelle laakerin ulkokehän sisäpuolella, jonka jälkeen naarmuja tehtiin lisää 15 millimetrin pituiselle alueelle. Tämän jälkeen laakeri vaihdettiin uuteen ja tehtiin ehjän laakerin referenssimittaus, minkä jälkeen laakerin sisäkehälle tehtiin 5 millimetrin pituiselle alueelle naarmuja.



Kuva 3.34. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 405 Hz syöttövaiheessa 1 sekä ehjällä moottorilla, että laakerivikaisella moottorilla, jonka käyttöakselin puoleisen laakerin ulko- ja sisäkehää on naarmutettu. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.34 nähdään, että jälleen muutoksia on lähinnä taajuuksilla 2 Hz ja 68 Hz. Myöskään lasketut laakerin sisä- ja ulkokehän vikojen aiheuttamien yliaaltokomponenttien esiintymistaajuudet eivät juurikaan osu niille taajuuksille, joilla muutoksia oikeasti oli havaittavissa.

Vertailun vuoksi laakerin sisäkehän ja ulkokehän vikojen värähtelyjen toistotaajuudet laskettiin yhtälöiden 2.8 ja 2.9 sekä taulukon 3.6 arvojen avulla. Samoin tehtiin myös vierintäelimen ja laakerin kuulien separaattorirenkaan vikojen toistotaajuuksille yhtälöiden 2.10 ja 2.11 avulla. Lasketut taajuudet on esitetty taulukossa 3.8.

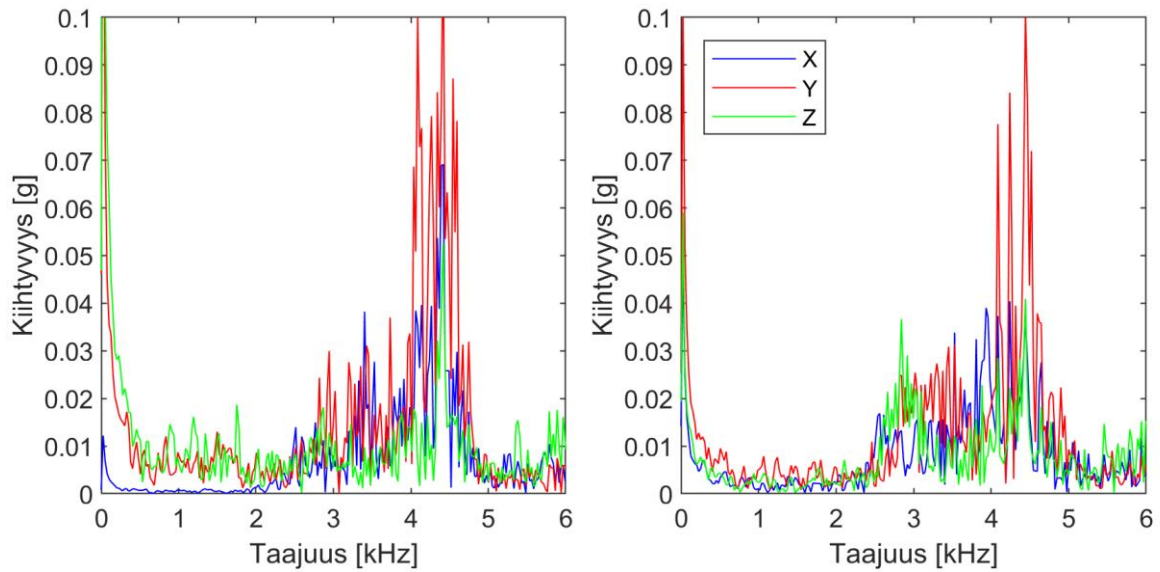
Taulukko 3.8. Yhtälöiden 2.8, 2.9, 2.10 ja 2.11 sekä taulukon 3.6 arvojen avulla lasketut moottorin värähtelyjen taajuudet, joilla yliaaltokomponentteja esiintyy. Näiden taajuuksilla värähtelyn amplitudin arvojen pitäisi nousta.

Toimintapiste	Ulkokehä	Sisäkehä	Vierintäelin	Laakerin separaattorirengas
35 Hz 100 %	60,25 Hz	88,91 Hz	41,54 Hz	9,88 Hz
50 Hz 100 %	87,60 Hz	129,26 Hz	60,40 Hz	14,36 Hz
35 Hz 50 %	62,17 Hz	91,73 Hz	42,86 Hz	10,19 Hz

Väriämittauksista saadusta mittaustuloksista on tehty kuvaajia, jotka löytyvät liitteestä 3. Näiden sijaan kuitenkin analysoitiin väriämittausten tulosten avulla tehtyjen verhoikäyrien kuvaajia, sillä näistä on yleensä paljon helpompaa analysoida laakerien kuntoa, kuin suoraan suodattamattomasta taajuussisällöstä tehdyistä kuvaajista.

Verhoikäyrät on luotu käyttäen MATLAB-ohjelmiston signaalinsuodatusominaisuuksia. Väriämittauksista saatu signaali ajetaan sekä ali- että ylipäästösuodattimen läpi. Lopuksi signaali käännetään taajuustasoon käyttäen MATLAB-ohjelmiston FFT-ominaisuuksia.

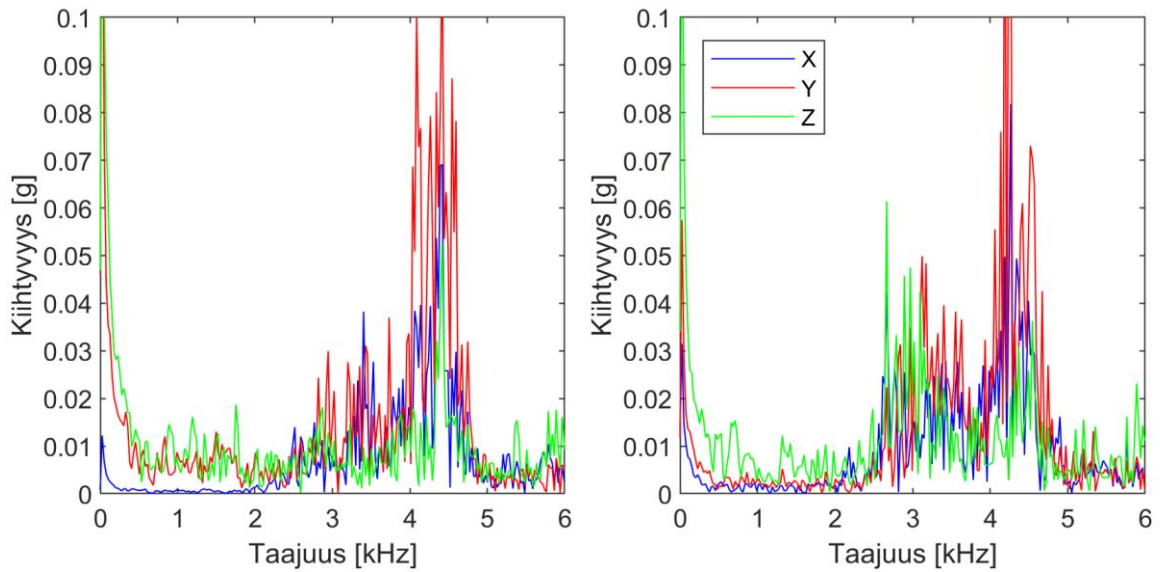
Kuvassa 3.35 on esitetty vasemmalla ehjän moottorin ja oikealla laakerivikaisen moottorin kiihtyvyyssantureilla mitatun värinän verhoikäyräkuvaaja. Kuvassa on nähtävissä X-, Y- ja Z-suunnat ja kiihtyvyys on ilmoitettu G-voimina, eli putoamiskiihtyvyyden g kerrannaisina.



Kuva 3.35. Ehjän (vasemmalla) ja laakerivikaisen (oikealla) moottorin värinän verhokäyräspektrit X-, Y- ja Z-suunnissa. Viallisen moottorin tuulettimen puoleiseen laakeriin on porattu reikä 2,2 mm halkaisijalla. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.35 voidaan nähdä, että vian myötä verhokäyräspektrissä on muutoksia. Huomatavimmat muutokset ovat 3 kHz ... 4 kHz taajuusalueella lisääntyneet värinäkomponenttien amplitudit. Ehjässäkin moottorissa nähdään suuriamplitudisia värinän taajuuskomponentteja noin 4,0 kHz ... 4,6 kHz taajuusalueella, joka voi mahdollisesti olla moottorin kotelon resonanssitaajuusalue.

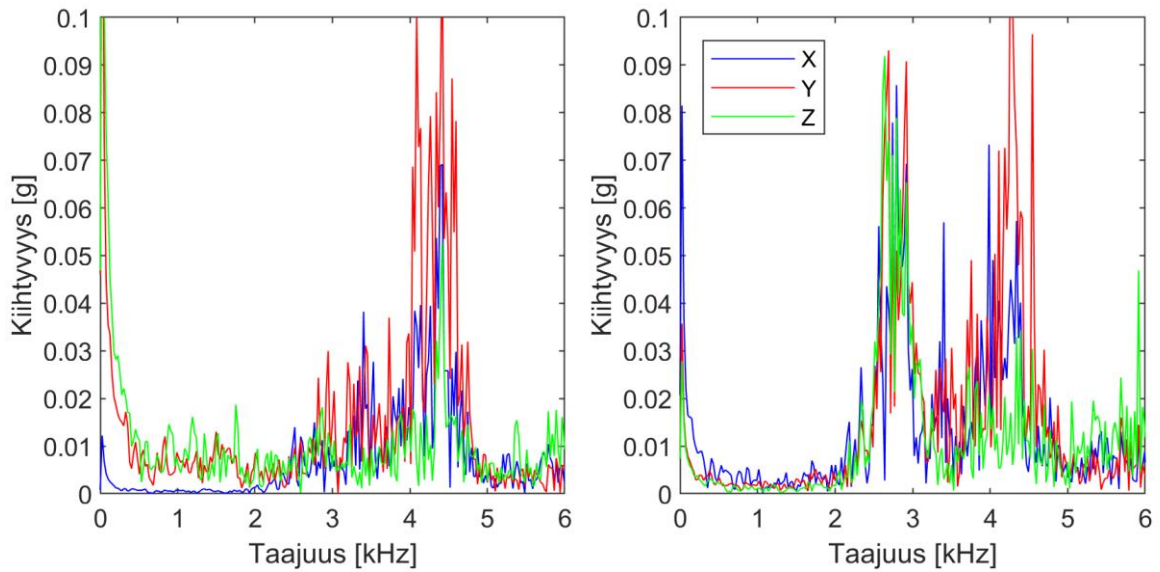
Kuvassa 3.36 on esitetty vasemmalla ehjän moottorin ja oikealla laakerivikaisen moottorin kiihtyvyyssantureilla mitatun värinän verhokäyräkuvaaja. Laakerivikaisen moottorin tuulettimen puoleiseen laakeriin on porattu reikä 3,2 mm halkaisijalla. Kuvan toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.



Kuva 3.36. Ehjän (vasemmalla) ja laakerivikaisen (oikealla) moottorin värinän verhoikäyräspektrit X-, Y- ja Z-suunnissa. Viallisen moottorin tuulettimen puoleiseen laakeriin on porattu reikä 3,2 mm halkaisijalla. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvassa 3.36 on nähtävissä samoja muutoksia, kuin kuvassa 3.35, mutta amplitudien kasvu on suurempaa. Taajuudella 4,5 kHz esiintyvän taajuuskomponentin amplitudi on lisäksi noussut voimakkaasti.

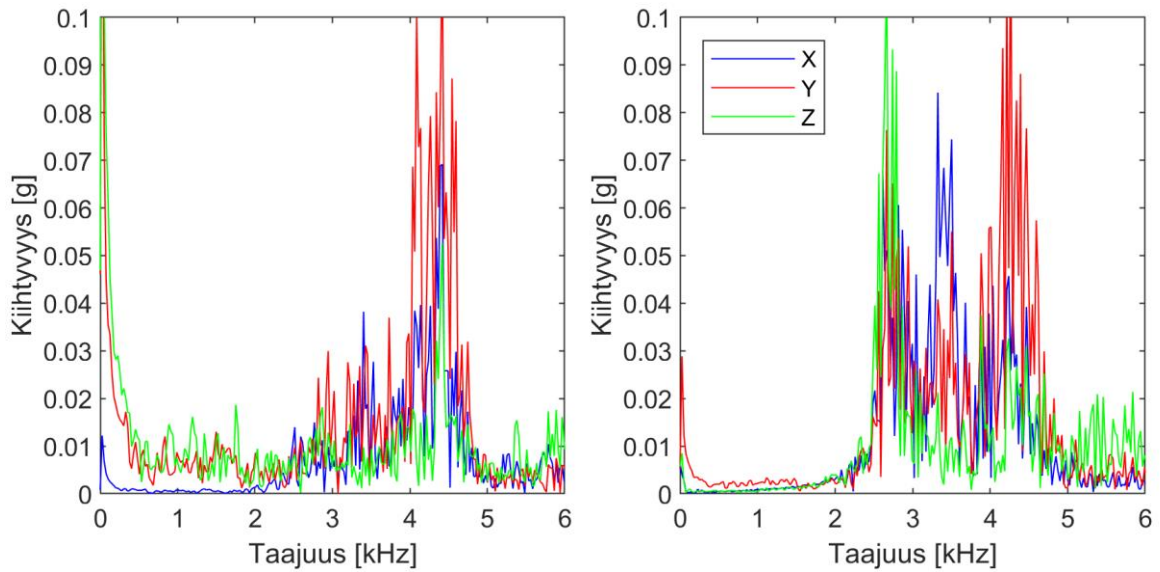
Kuvassa 3.37 puolestaan on esitetty vasemmalla ehjän moottorin ja oikealla laakerivikaisen moottorin kiihtyvyyksantureilla mitatun värinän verhoikäyräkuvaaja. Laakerivikaisen moottorin käyttöakselin puoleiseen laakeriin on porattu reikä 2,2 mm halkaisijalla laakerin alapuolelle. Kuvan toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.



Kuva 3.37. Ehjän (vasemmalla) ja laakerivikaisen (oikealla) moottorin värinän verhoikäyräspektrit X-, Y- ja Z-suunnissa. Viallisen moottorin käyttöakselin puoleiseen laakeriin on porattu reikä 2,2 mm halkaisijalla. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.37 voidaan nähdä, että taajuusalueella 2,5 kHz ... 3 kHz on värinän taajuuskomponenttien amplitudit kasvaneet huomattavasti. Pienempiä muutoksia, on nähtävissä myös 3 kHz ... 4 kHz taajuusalueella.

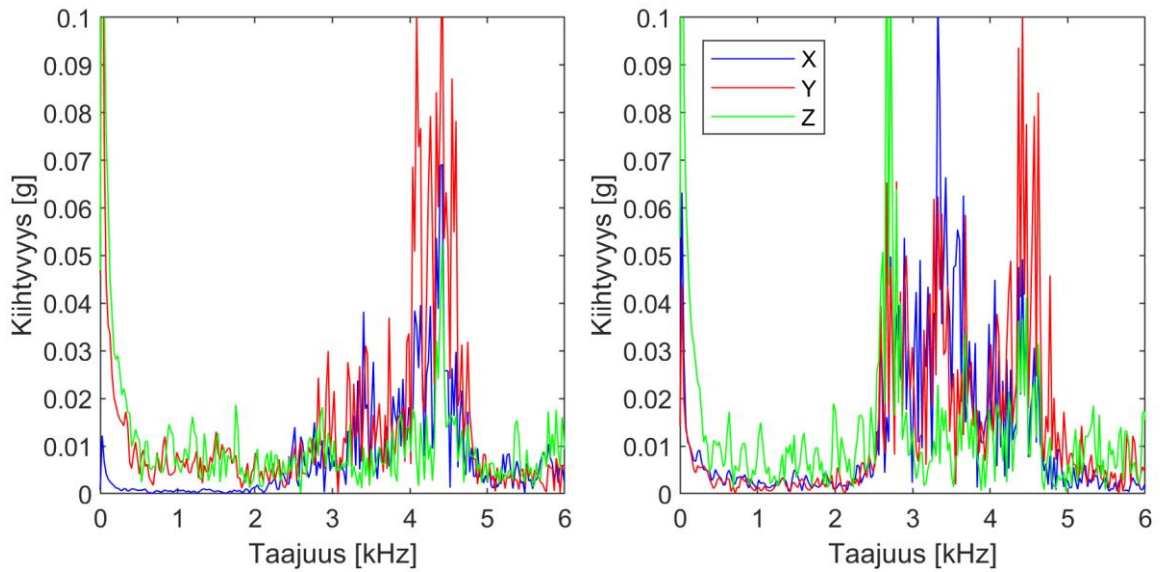
Kuvassa 3.38 on esitetty vasemmalla ehjän moottorin ja oikealla laakerivikaisen moottorin kiihtyvyyssantureilla mitatun värinän verhoikäyräkuvaaja. Laakerivikaisen moottorin käyttöakselin puoleiseen laakeriin on porattu reikä 2,2 mm halkaisijalla laakerin sivulle.



Kuva 3.38. Ehjän (vasemmalla) ja laakerivikaisen (oikealla) moottorin värinän verhoikäyräspektrit X-, Y- ja Z-suunnissa. Viallisen moottorin käyttöakselin puoleiseen laakeriin on porattu reikä 2,2 mm halkaisijalla. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.38 voidaan nähdä, että taajuusalueella 2,5 kHz ... 3,5 kHz on värinän taajuuskomponenttien amplitudit kasvaneet huomattavasti. Pienempiä muutoksia, on nähtävissä myös 4 kHz ... 4,5 kHz taajuusalueella. Huomattavaa on myös, että 0 kHz ... 2 kHz taajuusalueella värinän määrä on pienentynyt ehjään moottoriin nähden.

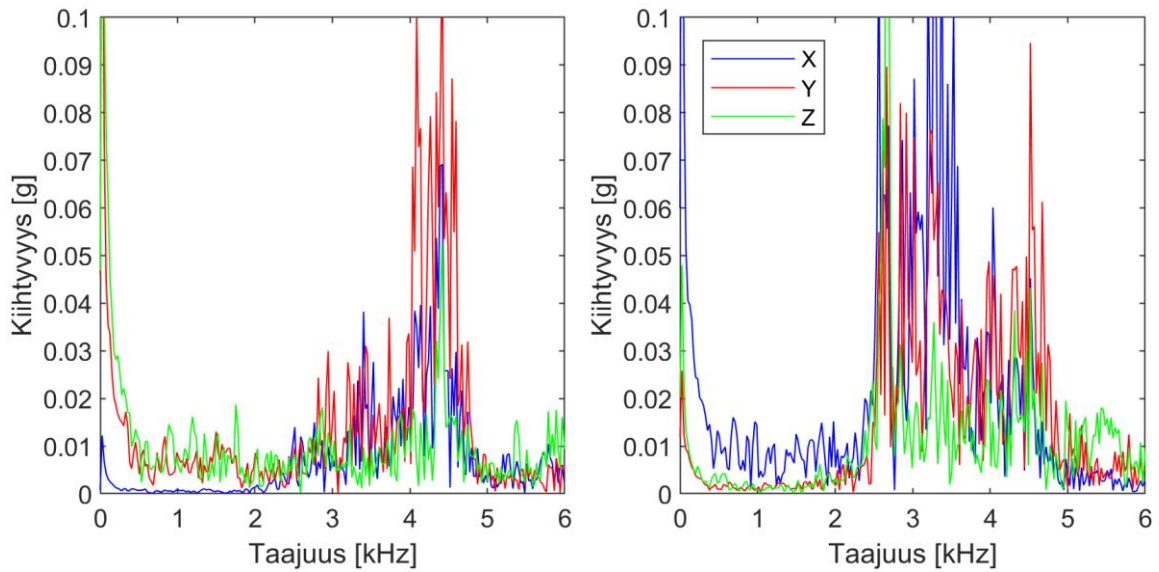
Kuvassa 3.39 on esitetty vasemmalla ehjän moottorin ja oikealla laakerivikaisen moottorin kiihtyvyyssantureilla mitatun värinän verhoikäyräkuvaaja. Laakerivikaisen moottorin käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehää on naarmutettu 5 mm pitkältä matkalta.



Kuva 3.39. Ehjän (vasemmalla) ja laakerivikaisen (oikealla) moottorin värinän verhoikäyräspektrit X-, Y- ja Z-suunnissa. Viallisen moottorin käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehää on naarmutettu. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.39 nähdään, että taajuusalueelle 0 kHz ... 3 kHz on tullut ehjään moottoriin verrattuna hiukan lisää pieniamplitudisia värinäkomponentteja. Taajuusalueella 3 kHz ... 4 kHz taas ovat suuriamplitudiset värinäkomponentit lisääntyneet. Z-suuntaiset komponentit ovat nousseet enemmän kuin X- ja Y-suuntaiset lähes koko mainitulla taajuusalueella.

Kuvassa 3.40 on esitetty vasemmalla ehjän moottorin ja oikealla laakerivikaisen moottorin kiihtyvyyssantureilla mitatun värinän verhoikäyräkuvaaja. Laakerivikaisen moottorin käyttöakselin puoleisen laakerin sisäkehää on naarmutettu 5 mm pitkältä matkalta.



Kuva 3.40. Ehjän (vasemmalla) ja laakerivikaisen (oikealla) moottorin värinän verhoikäyräspektrit X-, Y- ja Z-suunnissa. Viallisen moottorin käyttöakselin puoleisen laakerin sisäkehää on naarmutettu. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.40 nähdään, että taajuusalueelle 0 kHz ... 3 kHz on tullut ehjään moottoriin verrattuna hiukan lisää X-suuntaisia pieniamplitudisia värinäkomponentteja, kun taas muissa suunnissa värähtely on vähentynyt. Taajuusalueella 3 kHz ... 4 kHz taas ovat suuriamplitudiset värinäkomponentit lisääntyneet kaikissa suunnissa.

Reikien poraamisen ja naarmuttamisen lisäksi laakereihin aiheutettiin vikoja mm. naarmuttamalla laakerin vierintäelimiä sekä laakerin separaattorirenkaita. Kuvia näiden mittausten tuloksista löytyy liitteestä 3. Taulukossa 3.9 taas on esitetty mittausten perusteella hyväksi havaittuja vikaindikaattoreita laakerivioille.

Taulukko 3.9. Laakerivikojen hyväksi havaitut vikaindikaattorit.

Vika	Vikaindikaattorit
Reikä tuulettimen puoleisen laakerin ulkokehällä	Vika saatiin näkymään moottorin värinäspektrin verhoikäyräanalyysin avulla, kun taas moottorin vaihevirtojen taajuusspektrissä näkyvät muutokset olivat hyvin pieniä. Värinän yliaaltokomponentteja muodostui tutkitussa moottorissa eniten taajuusalueelle 3 kHz ... 4 kHz. Viasta

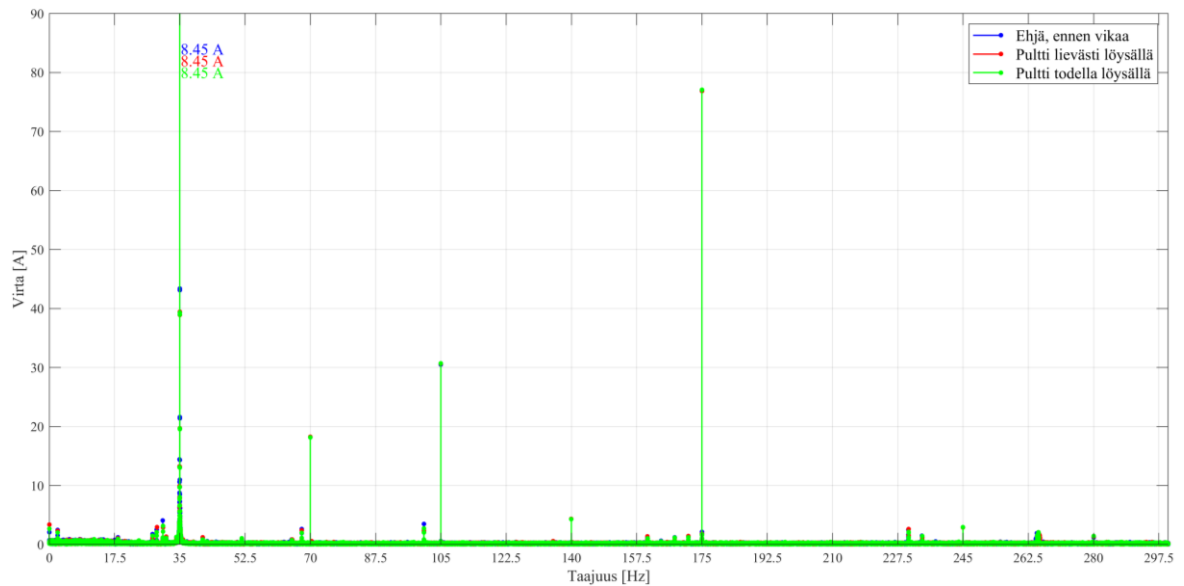
	aiheutuneet värinän yliaaltokomponenttien amplitudit nousivat vian pahetessa.
Reikä käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehällä	Vika saatiin näkymään sekä moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysin, että värinän taajuusspektrin verhokäyräanalyysin avulla. Vaihevirtojen yliaaltokomponenttien muutokset olivat kuitenkin pieniä, jonka vuoksi ne olivat vaikeasti havaittavissa. Värinän yliaaltokomponentteja muodostui tutkitussa moottorissa eniten taajuusalueelle 2,5 kHz ... 3,5 kHz riippuen siitä, millä puolella laakeria reikä oli.
Naarmu käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehässä	Vika saatiin näkymään sekä moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysin, että värinän taajuusspektrin verhokäyräanalyysin avulla. Vaihevirtojen yliaaltokomponenttien muutokset olivat hyvin pieniä ja ne näkyivät lähinnä taajuuksilla 30 Hz, 100 Hz ja 230 Hz. Värinän yliaaltokomponentteja muodostui tutkitussa moottorissa eniten taajuusalueelle 2,5 kHz ... 3,5 kHz.
Naarmu käyttöakselin puoleisen laakerin sisäkehässä	Vika saatiin näkymään moottorin värinän verhokäyräanalyysin avulla. Värinän yliaaltokomponentteja muodostui tutkitussa moottorissa eniten taajuusalueelle 2,5 kHz ... 3,5 kHz.

Kuten taulukosta 3.9 nähdään, aiheuttivat kaikki kokeillut viat muutoksia värinän taajuussisältöön, sekä osa laakerivioista myös vaihevirtojen taajuussisältöön. Kuitenkin, koska laakerien sisällä olevien vierintäelimien ja separaattorirenkaiden mittoja ei tarkkaan tunnettu, eivät lasketut taajuudet olleet samat, kuin ne, joille viat saivat aikaan virran ja värinän yliaaltokomponentteja.

3.5 Moottorin kiinnityksen löystyminen

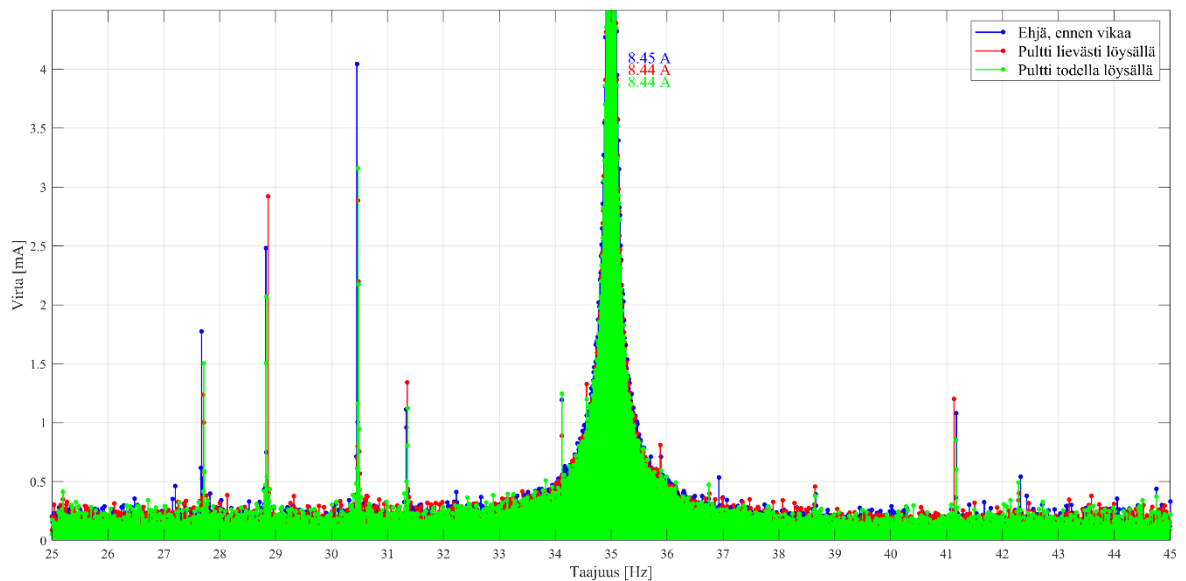
Moottorin kiinnitykseen aiheutettiin vika löysäämällä yhtä neljästä kiinnityspultista. Löysätyksi pultiksi valikoitui käyttöakselin puoleiselta puolelta toinen pultti. Ensin pulttia löysätettiin suurin piirtein niin paljon, kuin käsivoimin sen voi saada. Toinen vika toteutettiin niin, että pultti oli paikallaan, mutta aivan kiristämättä.

Kuvassa 3.41 on esitetty moottorin vaiheen 1 vaihevirran taajuuskomponentit. Kuvasta on nähtävissä sekä oikein kiinnitetyn moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit, että kahden kiinnitysvikaisenkin moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit.



Kuva 3.41. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 300 Hz sekä oikein kiinnitetyllä moottorilla, että kiinnitysvikaisella moottorilla. Mittauspisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.41 nähdään, että vika ei aiheuta juuri lainkaan muutoksia vaihevirtojen taajuuskomponenttien amplitudeissa. Eroavaisuutta on nähtävissä tällä taajuusalueella hyvin vähän. Kuvassa 3.42 onkin esitetty moottorin vaihevirtojen vaiheen 1 taajuuskomponentit eri taajuusalueella kuin kuvassa 3.41. Moottori ja aiheutetut viat sekä vertailukohteet ovat samoja, kuin edellisessä kuvassa.



Kuva 3.42. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 25 Hz ... 45 Hz sekä oikein kiinnitetyllä moottorilla, että kiinnitysvikaisella moottorilla. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.42 nähdään, että vika ei aiheuta kovinkaan suuria muutoksia taajuuskomponenttien amplitudeissa. Vain muutamat yksittäiset taajuuskomponentit erottuvat joukosta. Esimerkiksi taajuuksilla 31,3 Hz ja 41,1 Hz on nähtävissä, että lievä vika nostaa taajuuskomponenttien amplitudeja, mutta vakavampi vika on taas laskenut niitä. Mittauspisteiden välillä on luonnollisestikin pientä vaihtelua, joka ei välttämättä johdu viasta, mikä voisi selittää ilmiötä.

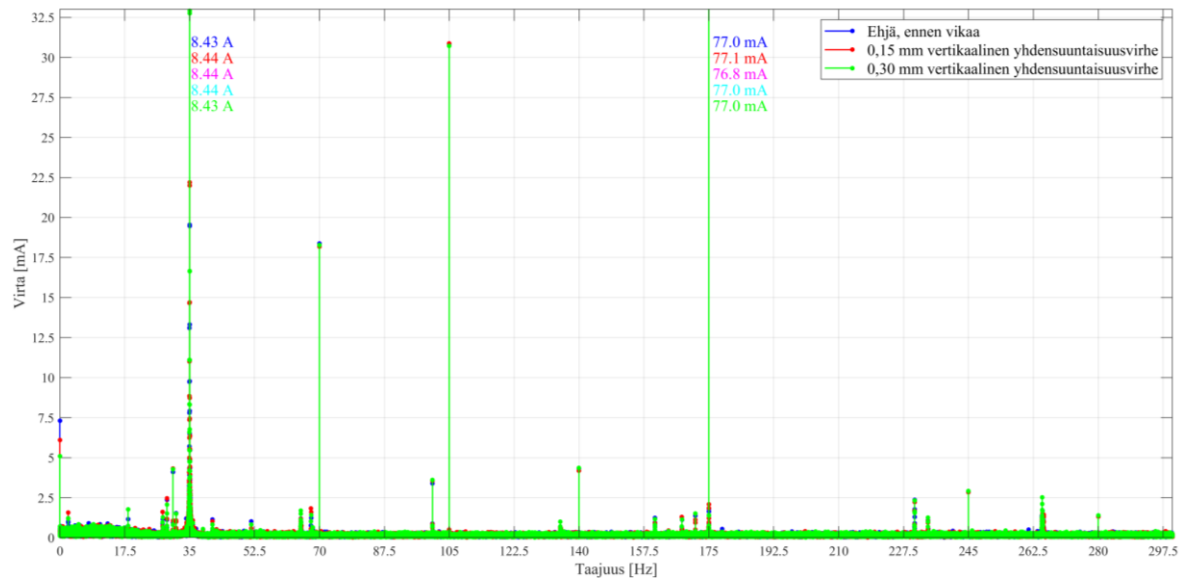
3.6 Moottorin linjausvirheet

Moottorin linjausvirheitä toteutettiin useaa eri tyyppiä. Mittauksissa toteutettiin tilanteet, jossa moottorin linjauksessa on vertikaalisuuntaista yhdensuuntaisuusvirhettä, vertikaalisuuntaista kulmavirhettä ja lopuksi sekä vertikaalisuuntaista yhdensuuntaisuusvirhettä, että vertikaalista kulmavirhettä.

Vertikaalisuuntainen yhdensuuntaisuusvirhe toteutettiin niin, että moottorin kaikkien neljän jalan alle lisättiin ylimääräisiä sovitelevyjä. Tämä toteutettiin sekä 0,15 mm että 0,30 mm paksuisilla kerroksilla ylimääräisiä sovitelevyjä. Vertikaalisuuntaista kulmavirhettä puolestaan aiheutettiin lisäämällä sovitelevyjä enemmän tuulettimen puoleisien jalkojen alle kuin

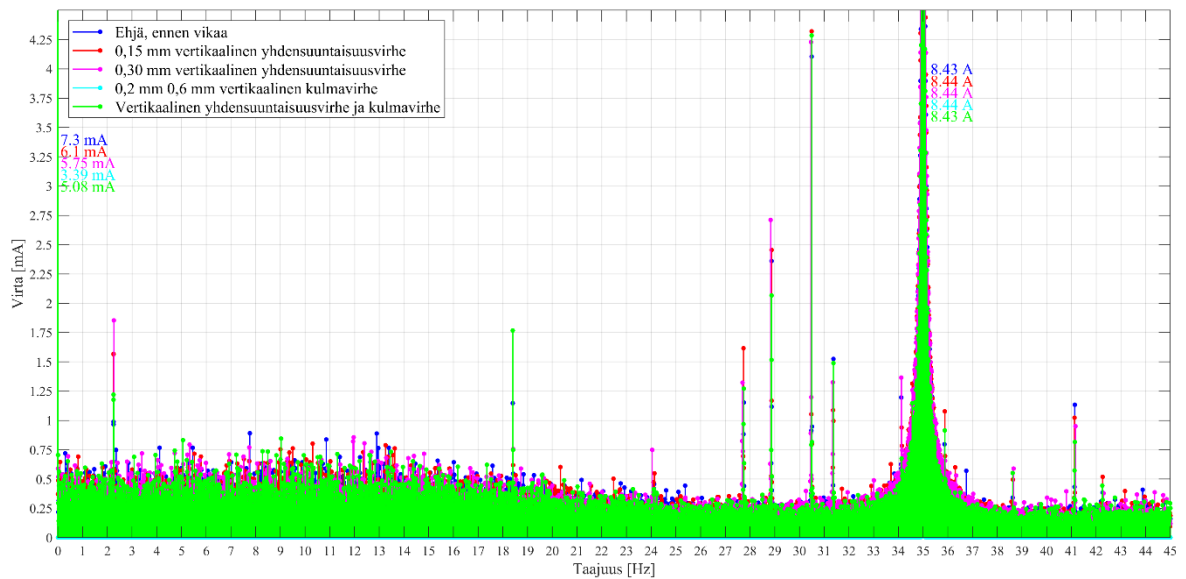
käyttöakselin puoleisien jalkojen alle. Käyttöakselin puolelle lisättiin 0,20 millimetriä ylimääräistä ja tuulettimen puolelle 0,60 mm. Yhdensuuntaisuusvirheen ja kulmavirheen yhdistelmä toteutettiin lisäämällä tuulettimen alle 0,40 millimetrin paksuudelta liikaa sovitelevyjä ja poistamalla levyt käyttöakselin puolelta, jolloin itse käyttöakseli oli noin 0,20 mm alempana kuin optimaalisessa tilanteessa.

Kuvassa 3.43 on esitetty edellä mainituista vertikaalisista yhdensuuntaisista linjausvirhoista, vertikaalisuuntaisesta kulmavirheestä ja näiden yhdistelmästä kärsivän moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 300 Hz sekä vertailukohtana oikein linjatun moottorin taajuuskomponentit samoilta taajuuksilta.



Kuva 3.43. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 300 Hz sekä ehjällä moottorilla, että vertikaalisuunnassa väärin linjatusta moottorista. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.43 nähdään, että vertikaalinen kulmavirhe aiheuttaa tietyillä taajuuksilla nousua taajuuskomponenttien amplitudien arvoihin. Tämä on nähtävissä erityisesti taajuuksilla 2 Hz, 51 Hz, 18 Hz ja 68 Hz. Kuvassa 3.44 on esitetty samat moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 45 Hz.



Kuva 3.44. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 45 Hz sekä ehjällä moottorilla, että vertikaalisuunnassa väärin linjatusta moottorista. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvasta 3.44 nähdään, että vertikaalinen kulmavirhe aiheuttaa tietyillä taajuuksilla nousua taajuuskomponenttien amplitudien arvoihin. Tämä on nähtävissä erityisesti taajuuksilla 2 Hz, 51 Hz, 18 Hz ja 68 Hz. Kuvista 3.43 ja 3.44 nähdään myös, että vertikaalisen yhdensuuntaisuusvirheen ja kulmavirheen yhdistelmä linjausvirheenä saa aikaan taajuuskomponenttien amplitudien nousua ainakin taajuuksilla 18 Hz, 52 Hz, ja 265 Hz. Muutokset ovat kuitenkin hyvin maltillisia ja on mahdollista, että vika oli liian pieni aiheuttaakseen huomattavia indikaattoreita vaihevirtoihin.

3.7 Akselin massaepätasapainon viat

Akselin massaepätasapainon viat aiheutettiin kiinnittämällä akseliin ylimääräisiä kappaleita. Ensin kiinnitettiin akselin käyttöpuolelle letkuliitin. Letkuliittimessä on ruuvi, joka aiheuttaa näin käytettynä massaepätasapainoa. Toiseen mittaukseen lisättiin myös tuulettimen puoleiseen päähän pultti, suurin piirtein samaan kohtaan akselin halkaisijan piiriä.

Yhtälön 2.15 avulla voidaan laskea, mille taajuuksille vaihevirtojen taajuuskomponentit, joiden amplitudin pitäisi nousta vian myötä, sijoittuvat. Jättämänä käytettiin yhtälön 2.1 avulla laskettua vikaa edeltävän ehjän moottorin mittauspisteen keskiarvojäätämää, joka oli 35 Hz

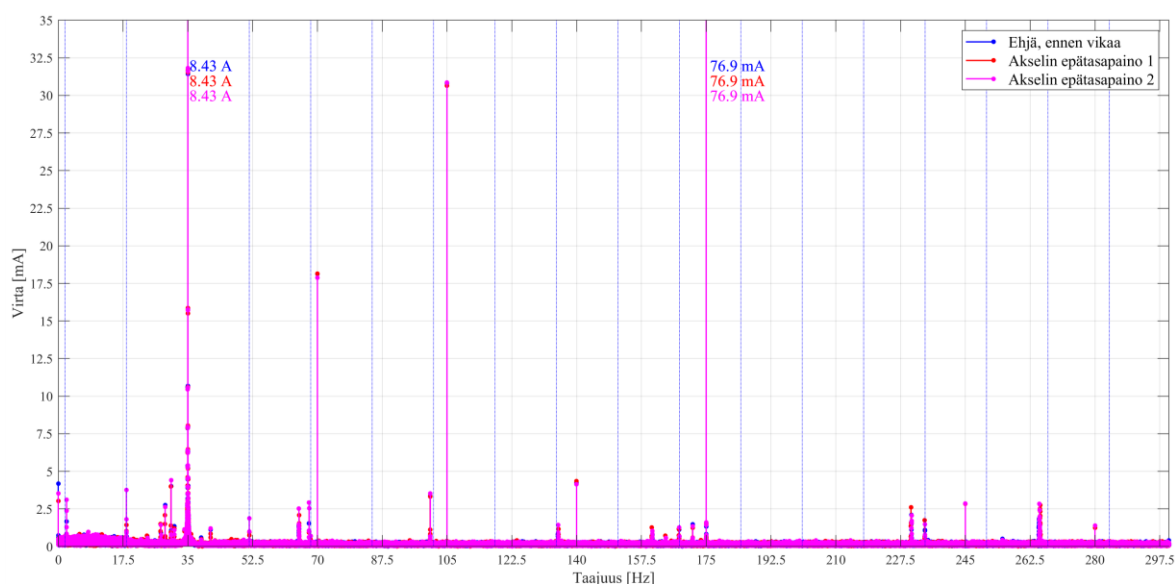
vaihevirtojen päätaajuudella ja moottorin nimellisvääntömomenttiin nähden 100 % kuormalla 5,18 %. Taajuuskomponenttien taajuudet löytyvät taulukosta 3.10.

Taulukko 3.10. Moottorin vaihevirtojen taajuuksia, joilla vaihevirtojen yliaaltokomponenttien amplitudit nousevat, kun akselilla on massaepätasapainoa.

	$k = -2$	$k = -1$	$k = 1$	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$
Taajuus [Hz]	1,813	18,41	51,59	68,19	84,78	101,37	117,97

	$k = 6$	$k = 7$	$k = 8$	$k = 9$	$k = 10$	$k = 11$	$k = 12$
Taajuus [Hz]	134,56	151,15	167,75	184,34	200,94	217,53	234,12

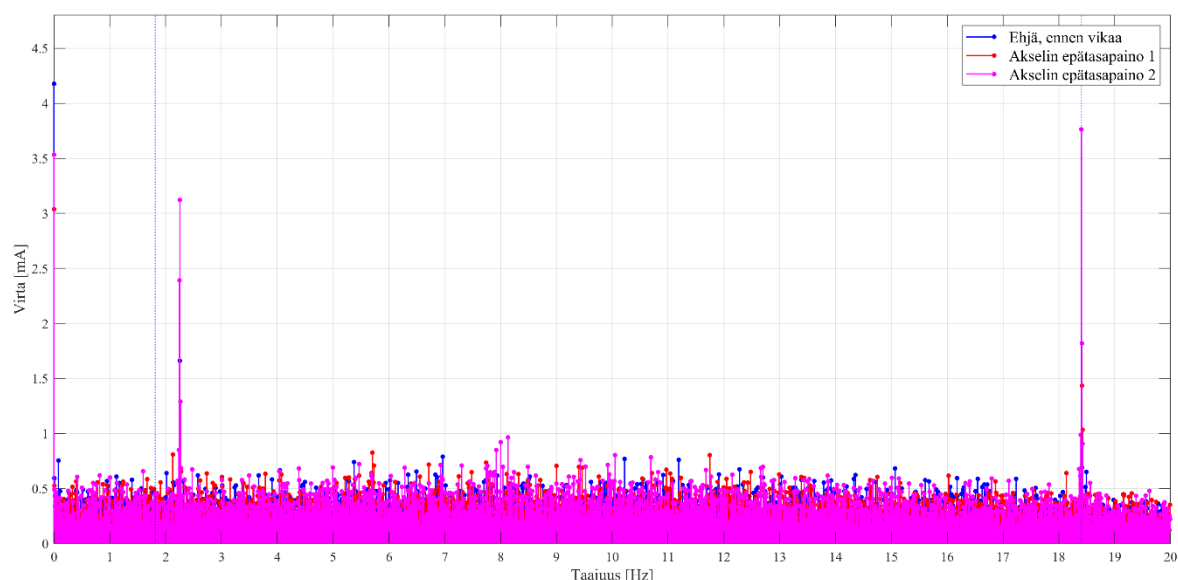
Kuvassa 3.45 on esitettyä moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentteja taajuusalueella 0 Hz ... 300 Hz sekä taulukon 3.10 arvoja vertailukohdaksi. Taulukossa esitetyt lasketut arvot on merkitty kuvaan sinisellä katkoviivalla. Ensimmäisessä pisteessä epätasapainoa on vain ulosoton puolella ja toisessa pisteessä epätasapainoa on lisätty myös tuulettimen puolelle.



Kuva 3.45. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuusalueella 0 Hz ... 300 Hz, kun akseliin on aiheutettu kahta erilaista massaepätasapainovikaa. Ensimmäisessä pisteessä

epätasapainoa on vain ulosoton puolella ja toisessa pisteessä epätasapainoa on lisätty myös tuulettimen puolelle. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvassa 3.46 on esitetty samoista tuloksista taajuusalue 0 Hz ... 20 Hz. Kuvasta nähdään helpommin, kuinka lasketun ja mitatun taajuuden arvon välillä on pientä eroavaisuutta, esimerkiksi kun laskettu arvo on 1,803 Hz, niin virtakomponentin taajuus onkin 2,258 Hz. Näitä eroavaisuuksia voi selittää mm. se, että laskuissa jättämänä käytettiin yhden toimintapisteen koko mittauksen keskiarvojäätämää, mikä oli 35 Hz syöttötaajuudella ja 100 % kuormalla 5,2 %.



Kuva 3.46. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuusalueella 0 Hz ... 20 Hz, kun akseliin on aiheutettu kahta erilaista massaepätasapainovikaa. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvista 3.45 ja 3.46 on nähtävissä, että pientä amplitudin kasvua on havaittavissa usealla taajuuskomponentilla. Esimerkiksi taajuuksilla 2 Hz, 18 Hz, 52 Hz, 68 Hz, 134 Hz, 234 Hz ja 265 Hz näyttäisi taajuuskomponenttien amplitudit olevan suurempia viallisissa

moottoreissa, kuin ehjissä. Kaikki edellä mainitut taajuudet osuvat melko lähelle jotakin laskettua yliaaltokomponenttien esiintymistaajuutta, joita taulukossa 3.10 on mainittu.

3.8 Mittaustuloksien yhteenveto

Mittauksissa käytettiin viittä eri toimintapistettä, jotka määrittivät moottorin vaihevirtojen päätaajuuden, sekä sen, mikä vääntömomenttiohje kuormakoneelle annettiin ajettavan moottorin nimelliseen vääntömomenttiin nähden. Nämä toimintapisteen olivat vaihevirtojen päätaajuudella 35 Hz vääntömomenttiohjeet 100 %, 75 % ja 50 %, taajuudella 50 Hz 100 % ja taajuudella 25 Hz 50 %.

Edellä mainitut toimintapisteen valittiin, jotta vikojen vaikutuksia voitaisiin tarkastella erilaisilla käyttöalueilla. Hyvin matalilla pyörimisnopeuksilla ei kuitenkaan voitu moottoria ajaa kuormitettuna, sillä mittausten aikana moottoreissa ei ollut ulkoista jäähdytinjärjestelmää, eli jäähdytyksenä oli vain moottorin oma tuuletin akselin päässä.

Syöttötaajuuden 50 Hz valitsemiselle oli toinenkin peruste. Koska syöttävän verkon taajuus on 50 Hz, joutuu 50 Hz syöttötaajuuden ja 100 % vääntömomenttiohjeen toimintapisteesä taajuusmuuttaja kentänheikennys- tai ylimodulointialueelle. Toimintapiste otettiin mukaan, jotta nähtäisiin, vaikuttaako tämä vikaindikaattoreiden näkyvyyteen.

Mittauksissa käytetyn vikaresistanssin arvoa vaihdeltiin, sillä pienenä ja suurena pidettävät vikaresistanssin arvot vaihtelevat sen mukaan, mistä viasta on kyse. Staattorikäämin virtapiirin resistanssi käytetyissä moottoreissa oli noin $4,13 \Omega$ noin $23 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpötilassa mitattuna.

Mittauksissa selvisi, että esimerkiksi roottorisauvavikojen osalta on selvästi havaittavissa, että muuntamalla vaiheviritat aikatasosta taajuustasoon, voidaan roottoriviat tunnistaa melko luotettavasti. Lasketut arvot eivät eronneet mitatuista arvoista juuri lainkaan, sillä erot olivat suurimmassa osassa mittauspisteistä vain hertsin kymmenyksiä. Moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysi vaikutti olevan hyvä keino roottorisauvavikojen löytämiseen.

Mittauksissa selvisi, että syöttö- ja staattoriviat aiheuttavat muutoksia vaihevirtojen päätaajuuden symmetrisiin komponentteihin. Tämä mahdollistaa kyseisten vikojen havaitsemisen, mutta niiden erottaminen toisistaan on tästä huolimatta haastavaa.

Laakerivikojen kohdalla laskettujen arvojen paikkansa pitävyys erottui muista vioista selkeästi. Laskettujen yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksien arvot eivät vastanneet mitattuja arvoja juuri lainkaan. Laakerivikojen tunnistaminen onkin tiedettävästi luotettavampaa värinämittausten avulla. Tämä voi kuitenkin osaltaan johtua myös vääristä laakerin osien mitoista, kuten vierintäelimien halkaisijoista, sillä nämä tiedot olivat peräisin valmistajan verkkosivuilta löytyneestä CAD-mallista. Myös jättämän arvon laskentatavalla voi olla merkitystä tuloksiin.

Yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksien laskennassa käytettiin jättämän arvoina ennen vikaa mitattujen ehjänä pidettyjen moottorien mittaustuloksista laskettuja keskiarvojättämiä. Laakerin vaihto vaatii aina moottorin osittaista purkamista ja uudelleenksaamista. Tämä voi osaltaan vaikuttaa laskettujen ja mitattujen taajuuksien eroavaisuuksiin, sekä moottorin linjaukseen.

Laakereita jouduttiin myös vaihtamaan uusiin eri mittauspisteiden välissä, sillä esimerkiksi poraamalla vikaannutettuja laakereita ei olisi voinut korjata. Tämän vuoksi käytettyjen laakerien välillä voi siis luonnollisesti olla eroavaisuuksia mm. valmistusteknisistä syistä.

Mittaustuloksien perusteella hyväksi havaitut tavat eri vikojen mahdolliseen havaitsemiseen taulukoitiin taulukkoon 3.11. Taulukko on muodostettu mittaustuloksien analyysin perusteella.

Taulukko 3.11. Mittaustulosten perusteella hyväksi havaittuja tunnistusmenetelmiä eri vioille.

Vika	Hyväksi havaitut tunnistustavat
Väärin päin kytketyt syöttöjohtimet	Silmämääräisesti havaitseminen pienellä pyörimisnopeudella tai pyörimisnopeusdataa seuraamalla.
Epäsymmetrinen syöttö	Moottorin vaihevirtojen aaltomuotokuvaajasta eri vaiheiden virtojen amplitudien vertailu, virran THD:n arvo kasvaa. Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetriset komponentit, vastakomponentin arvo nousee.
Staattorikämmien kierrossulku	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetriset komponentit, myötä- ja vastakomponentin arvot nousevat, nollakomponentin arvo hiukan laskee.

Staattorikäänin käänisulku	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetriset komponentit, myötä- ja vastakomponentin arvot nousevat.
Staattorikäänin maasulku	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetriset komponentit, nollakomponentin arvo nousee moninkertaiseksi jos suurellakin vikaresistanssilla.
Moottorin epäsymmetriavika	Moottorin vaihevirtojen päätaajuuden symmetriset komponentit, vastakomponentin arvo nousee.
Roottorisauvavika	Moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysi, virran THD:n arvo laskee hiukan.
Laakeriviat	Kirjallisuuden perusteella moottorin värinän taajuusanalyysi. Moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysin tulos jäi mittauksissa melko epävarmaksi.
Akselin massaepätasapaino	Mittausten perusteella vaihevirtojen taajuusanalyysi, kirjallisuuden perusteella myös moottorin värinän taajuusanalyysi.

Taulukon 3.11 perusteella voidaan havaita, että monet viat vaikuttavat samoihin vikaindikaattoreihin, joten mikään yksittäinen menetelmä ei yksistään riitä kaikkien vikojen havainnointiin, vaan ne tukevat toisiaan ja ovat käyttökelpoisia eri tilanteissa. Tämä selittää sitä, miksi osassa markkinoilla olevista kunnonvalvontaan tarkoitetuista laitteistoista on mahdollisuus useamman kuin yhden menetelmän käyttämiseen. Esimerkiksi staattorivikojen erottaminen toisistaan on monessa tapauksessa mahdotonta pelkän virranmittauksen avulla, sillä kuten taulukosta 3.3 voidaan nähdä, vaikuttavat eri staattoriviat moniin keskenään samoihin vikaindikaattoreihin.

4 Johtopäätökset

Ensimmäisten mittausten jälkeen selvisi, että moottori ei ollut suunnattu täydellisesti, vaan siellä oli pientä linjausvirhettä jopa niissä mittauksissa, joissa moottoria pidettiin ehjänä ja oikein linjattuna. Tämän vuoksi syöttövioissa, sekä joissain staattorivioissa, saattaa esiintyä myös linjausvirheistä johtuvia indikaattoreita, eli vääriä hälytyksiä, mikä tietyllä tapaa heikentää mittaustulosten toistettavuutta.

Moottorin vaihevirtojen taajuusanalyysi oli mittaustulosten perusteella erittäin hyvä tapamme roottorivikojen tunnistamiseen, jossa lasketut taajuudet olivat hyvin lähellä mitattuja. Menetelmällä pystytään mittaustulosten valossa myös havainnoimaan akselin massaepätasapainovikoja. Kirjallisuuden perusteella myös laakerivikojen pitäisi olla havaittavissa virtojen taajuusanalysillä, mutta todennäköisesti taulukossa 3.6 esitettyjen laakerin epätarkkojen mittojen vuoksi ei haluttuun lopputulokseen tämän työn mittauksissa päästy.

Moottorin vaihevirtoihin vaikutti mittaustuloksien perusteella ilmaantuvan vikaantuessa eri suuruisia virran yliaaltokomponentteja, joiden taajuus oli lähellä moottorin syöttötaajuutta. Tätä havaintoa ei voi hyödyntää vikojen erottamiseen toisistaan, mutta se monesti kieli siitä, että moottorissa voi olla jokin vika.

Moottorin vaihevirtojen symmetrisien komponenttien laskeminen osoittautui mittaustulosten valossa hyväksi tavaksi tunnistaa erityisesti staattori- ja syöttövikoja. Kuten taulukosta 3.3 nähdään, virran vastakomponentin arvoa nostaa useampikin eri staattorivika. Tämän vuoksi voi olla hankalaa sanoa, mikä vika virran vastakomponentin nousun aiheuttaa, mutta kun tiedetään että vika on olemassa, niin toimenpiteisiin tulisi ryhtyä joka tapauksessa, ennen kuin muitakin osia vikaantuu. Virran nollakomponentin arvon nousun havaittiin kielivän siitä, että moottorissa on maasulku. Sen nousu oli mittauksissa hyvin voimakasta, vaikka maasulku toteutettiin 1632Ω vikaresistanssin kautta.

Virtojen vastakomponenttia nostaa virran epäsymmetria, joten jos moottoria syötetään verkosta, jonka jännite on epäsymmetrinen, niin se voi ilmetä virran vastakomponentin nousuna ja aiheuttaa väärän hälytyksen. Taajuusmuuttajakäytöissä näin ei pitäisi käydä, mikäli taajuusmuuttajassa ei ole vikaa.

Pääasiassa mittaustulokset vaikuttivat siltä, että ne tukevat jo olemassa olevaa teoretietoa oikosulkumoottorin kunnonvalvonnasta ja erilaisien vikojen aiheuttamista

taajuuskomponenteista esimerkiksi moottorin vaihevirroissa. Mittauksissa kuitenkin näkyi ehjienkin koneiden mittauksissa kohinan määrä, mitä pulssinleveysmodulaatio saa aikaan. Yleisesti ottaen vaikuttaisi siltä, että kun pyörimisnopeus ja jättämä huomioidaan laskettaessa virtojen yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia, niin samat yhtälöt pätevät taajuusmuuttajakäyttöiselle oikosulkumoottorille kuin suoraan verkkosyöttöisellekin oikosulkumoottorille.

Laakeriviat tekivät mittaustulosten valossa poikkeuksen, kuten taulukosta 3.9 voidaan nähdä, mutta mukana oli niin paljon epävarmuustekijöitä, että pelkästään näiden mittausten valossa ei voida tehdä johtopäätöksiä. Tämä koski sekä moottorin vaihevirtojen mittaustulosten, että moottorin värinän mittaustulosten analyysia, sillä kumpaankin liittyy laakerien sisällä olevien osien fyysiset mitat, jotka jäivät epätarkoiksi arvioiksi, koska valmistaja ei ole julkaissut mittoja, eikä laakeria halkaistu niiden mittaamiseksi.

Sekä kirjallisuuden, että laakerien värinämittausten perusteella voidaan todeta, että pelkästä värinän taajuussisällöstä on erittäin hankalaa havainnoida, että muuttuuko jokin tietty taajuus, kuten vaikkapa laskettu laakerin toistotaajuus, kun vika on pieni eikä aiheuta suhteessa suuria muutoksia. Ilmiö korostuu syöttötaajuuden lähestyessä verkon taajuutta, jolloin mennään ylimoduloinnin tai kentänheikennyksen alueelle. Tämän vuoksi yleensä moottorin värinää analysoidessa mittaustuloksia käsitellään ja tehdään verhoikäyräanalyysi.

Mittaustuloksista laskettiin edellä mainittujen indikaattorien lisäksi moottorin vaihevirtojen THD+N:än arvot. Kuten mittaustuloksista voi nähdä, virtojen THD+N:än arvot muuttuivat tiettyjen vikojen tapauksessa, mutta niistä on silti vaikeaa päätellä mitään, sillä virtojen THD+N:n eroavaisuutena virtojen THD:en on vain kohinan huomiointi yhtälön 2.3 mukaisesti. Nämä arvot voivat vaihdella taajuusmuuttajien välillä mahdollisesti riippuen mm. nimellistehosta, joten niitä ei sellaisenaan voida käyttää yleistettävänä indikaattoreina eri vioille, sillä kohinaan voidaan olettaa vaikuttavan niin moni muukin asia, kuin moottorissa esiintyvät viat.

Mittauksissa selvisi, että staattorikäänien kierrossulkuvikaisten moottoreiden ja ehjien moottoreiden vaihevirtojen aaltomuotokuvaajissa, moottorin vaihevirtojen THD:n arvoissa ja moottorin vaihevirtojen THD+N:än arvoissa oli eroavaisuuksia riippuen siitä, oliko vikaa emuloitu kytkemällä vastus koko staattorikäänin rinnalle, vai oliko vika toteutettu uudelleenikäänityn moottorin avulla oikeasti. Tämä voidaan todeta mm. vertaamalla kuvia 3.10 ja

3.13. Vikaresistanssit yritettiin saada vastaamaan toisiaan kokoluokalta huomioimalla osittain oikosuljettujen staattorikämmikierrosten määrät, mutta tällä ei asiaan ollut vaikutusta. Eroavaisuudet saattavat johtua siitä, että oikeassa viassa vain pieni osa kämmikierroksista oli kierrossulussa, jolloin suurin osa kämmistä ei ole viallinen.

Roottorisauvavikaisessa moottorissa vaihevirtojen THD:n ja THD+N:än arvot pienenevät, kun vika toteutettiin poraamalla roottorisauvaan reikä. Muutokset olivat kuitenkin niin pieniä, että ne voivat johtua esimerkiksi jättämän muutoksesta, sillä jättämän keskiarvot vaihtelivat ehjän ja roottorivikaisen moottorin välillä samalla tavalla, kuin virran THD:n arvotkin vaihtelivat. Jättämän arvot on esitetty taulukossa 3.5 ja virran THD:n kehitys on nähtävissä kuvassa 3.31.

Kaupallisia kunnonvalvonnan laitteistoja muutamilta eri valmistajilta on jo markkinoilla. Osa laitteistoista on moottorin käynnin aikana moottorista dataa kerääviä ja osa on esimerkiksi huoltoseisauksen aikaan käytettäviä. Ensimmäistä ryhmää edustavissa laitteistoissa huomionarvoista lienee on, että laitteistoissa vaikutti olevan modulaarisia laitteita, joihin voidaan eri laitteita lisäämällä analysoida mm. moottorin vaihevirtoja tai värinöiden taajuuskomponentteja, mutta oli myös pelkän värinädatan hyödyntämiseen tukeutuviakin laitteita. Yhteistä näille laitteistotyypeille kuitenkin useilla valmistajilla oli liitettävyyys yhteen ohjelmistoon ja pilvipalveluiden hyödyntäminen mittaustulosten käsittelyssä. Pilvipalveluiden avulla voidaan säästää kuluttajille myytävien laitteiden prosessointitehon tarpeessa ja siten laitteen tuotantokustannuksia saadaan alennettua.

Tämän työn mittaustuloksienkin perusteella voidaan sanoa, että tietyt kunnonvalvonnan menetelmät ovat parempia tiettyjen vikojen havaitsemisessa kuin toiset, eikä yksikään menetelmä ole kaikkien vikojen kohdalla paras tai välttämättä edes käyttökelpoinen. Tämän vuoksi on täysin ymmärrettävää, että myös joissakin kaupallisissa laitteistoissa käytetään useampaa kuin yhtä menetelmää yhtä aikaa.

Eri valmistajat käyttävät laitteistoissaan keskenään teknisiltä ominaisuuksiltaan erilaisia antureita. Virtamittauksiin käytettävässä Omron K6CM-CI:n virta-anturin tarkkuudeksi on ilmoitettu $\pm 1,0$ % mittaustuloksesta ± 1 pienin esitettävä luku ja mitattavan virran taajuuskaistaksi 20 Hz ... 80 Hz (Omron Corporation 2022). Värinämittauksissa käytettävistä kiihtyvyyssantureista Omron ilmoittaa anturinsa taajuuskaistaksi 10 Hz ... 10 kHz, suurimmaksi kiihtyvyyden amplitudiksi 10 g ja tarkkuudeksi ± 3 dB ± 2 pienintä esitettävää lukua (Omron

Corporation 2022), kun taas Schaeffler ilmoittaa Optime-5:en värähtelyanturin taajuuskaistaksi 2 kHz ... 5 kHz ja suurimmaksi kiihtyvyyden amplitudiksi ± 16 g (Schaeffler Technologies AG & Co. KG 2022).

Edellä mainitut tuotteet ovat kaupallisesti saatavilla olevia tuotteita. Kaikkea tietoa antureista ei julkisesti ole saatavilla, mutta saatavissa olevista tiedoista voitaisiin päätellä, että värähtelymittausten taajuuskaistaksi riittäisi käytännön sovelluksissa 2 kHz ... 5 kHz, mutta Omronin tuotekatalogin mukaan tiettyjä epänormaaleja tiloja moottorista voidaan havaita aiemmin, jos värähtelyä voidaan mitata 10 kHz taajuudelle asti (Omron Corporation 2020). Anturien tekniset ominaisuudet määrittävät sen mukaan, millaiseen kohteeseen kunnonvalvontalaitteistoa asennetaan.

5 Yhteenveto

Tässä työssä tutkittiin, voidaanko taajuusmuuttajakäyttöisten oikosulkumoottorien kunnonvalvonnassa hyödyntää samaa teoriatietoa kuin verkkosyöttöisten oikosulkumoottorien tapauksessa ja minkälaisia antureita markkinoilla olevissa laitteissa valmistajien mukaan käytetään. Oikosulkumoottorien kunnonvalvonta ei ole aiheena millään tavalla uusi, vaan sitä on tutkittu jo vuosien ajan, mutta suuri osa tutkimuksesta kohdistunut verkkosyöttöisiin oikosulkumoottoreihin.

Työssä toteutettiin eri vikoja taajuusmuuttajakäyttöiseen oikosulkumoottoriin ja tehtiin mittauksia eri toimintapisteissä. Mittausdatan avulla saatiin mm. tehtyä moottoreiden vaihevirtojen taajuusanalyysejä, sekä jaettua mitatut vaihevirratt symmetrisiksi komponenteikseen. Tuloksia vertailtiin siihen, millaisia tulosten olisi teorian mukaan pitänyt olla. Todettiin, että suurin osa eri vioista näkyy taajuusmuuttajakäyttöisen oikosulkumoottorin vaihevirtojen symmetrisissä komponenteissa sekä yliaaltosisällössä samalla tavoin kuin verkkosyötetyssä oikosulkumoottorissa. Laakerivikojen kannalta tulokset jäivät epäselviksi käytettyjen laakereiden osien mittojen arviointiin käytetyn menetelmän osoittauduttua huonoksi.

Kaupallisia laitteita kunnonvalvontaa varten löytyi erilaisia. On laitteita, jotka mittaavat pelkkää moottorin värinää ja laitteita, jotka mittaavat moottorin vaihevirtaa. Mittausten perusteella analysoidaan, onko moottorissa mahdollisesti jokin vika ja kuinka vakava se on.

Työn lopputulokset eivät olleet yllättäviä, sillä vaikka moottorin syöttötapa olikin erilainen, niin itse oikosulkumoottori oli ihan tavallinen oikosulkumoottori. Taajuusmuuttaja kuitenkin mahdollistaa moottorin ajamisen eri toimintapisteissä, mikä mahdollistaa mittaukset useissa eri toimintapisteissä, mutta toisaalta taas laajentaa moottorin käytettävissä olevaa pyörimisnopeusalueita. Tällöin myös vikojen analyysissä täytyy huomioida, että pyörimisnopeus voi olla myös jokin muu, kuin jättämän määrittämä hieman tahtinopeudesta pienempi pyörimisnopeus, sillä moottorin ajaminen eri toimintapisteissä vaikuttaa siihen, kuinka eri vikaindikaattorit ilmenevät. Voidaan sanoa, että työlle asetetut tavoitteet täyttyivät, sillä tutkimuskysymyksiin löydettiin vastauksia.

Aiheesta voi tehdä jatkotutkimuksia esimerkiksi siitä, kuinka taajuusmuuttajasyöttöisyys vaikuttaa oikosulkumoottorin värinäkomponentteihin. Myös eri laakerivikojen aiheuttamia moottoriin syötettävän virran yliaaltoja voitaisiin analysoida tarkemmin, kun laakereiden

osien oikeat mitat tunnettaisiin, jotta laskenta olisi luotettavampaa. Muita moottorityyppisiä oikosulkumoottorin kanssa samankaltaisella staattorin rakenteella, kuten esimerkiksi kestopagneettitahtimoottoreita tai synkronireluktanssimoottoreita, voisi tutkia lähtökohtaisesti saman teorian pohjalta kuin oikosulkumoottoreitakin.

Taajuusmuuttajakäyttöisien moottorien yleistyessä mm. sähköisten kulkuvälineiden yleistymisen sekä teollisuuden energiakustannuksissa säästämiseen pyrkimisen myötä tulee tulevaisuudessa todennäköisesti olemaan enemmän kysyntää taajuusmuuttajalla syötettyjen moottorien kunnonvalvonnan sovelluksille, kuin aikaisemmin on ollut. Laskentatehon hankintahinnan laskiessa ja pilvipalvelujen kehittyessä myös mittaamalla saatavan tiedon prosessointi ja analysointi helpottuu sekä nopeutuu. Tulevaisuudessa esimerkiksi tuotantolaitoksissa sähkömoottorien tietyin väliajoin tehtäviä määräaikaishuoltoja ja -tarkistuksia voitaisiin ennakoivaa kunnonvalvontaa hyödyntämällä harventaa, sillä korjaustoimenpiteisiin voidaan varautua, kun jostakin viasta aletaan näkemään merkkejä.

Taajuusmuuttajat sisältävät virta-antureita ja voivat kommunikoida muiden laitteiden kanssa. Tämän takia tulevaisuudessa voisi tutkia, olisiko taajuusmuuttajiin itseensä kannattavaa lisätä moottorin kunnonvalvontaan liittyviä ominaisuuksia ja minkä tyyppisiä virtaantureita taajuusmuuttajissa pitäisi käyttää ja millainen laskentateho olisi riittävä, jotta tämä onnistuisi.

Lähteet

- ABB. 2001. Tekninen opas nro 6 – Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.03.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf.
- ABB. 2021. Detailed information for: 3GBA102810-ADD. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.10.2022]. Saatavissa: <https://new.abb.com/products/3GBA102810-ADD/3gba102810-add>.
- ANSI/IEEE Std 519. 1981. IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Convertors. New York, New York, Yhdysvallat: IEEE. Viitattu 17.01.2023. ISBN 0-7381-4225-5.
- Asad, B., Vaimann, T., Kallaste, A. ja Belahcen, A. 2019. Harmonic Spectrum Analysis of Induction Motor With Broken Rotor Bar Fault. Teoksessa: *2018 IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riika, Latvia, 12.–13.11.2018. IEEE. Viitattu 31.10.2022. DOI: 10.1109/RTUCON.2018.8659842.
- Baccarini, L. M. R., Rocha e Silva, V. V., de Menezes, B. R., Caminhas, W. M. 2011. SVM practical industrial application for mechanical faults diagnostic. *Expert systems with applications*, 07/2011, Vol. 38 (6), 6980 – 6984. Viitattu 19.01.2023. DOI: 10.1016/j.eswa.2010.12.017.
- Das, J. C. 2015. Power system harmonics and passive filter designs. *IEEE press series on power engineering*, Hoboken: New Jersey, Yhdysvallat: John Wiley and Sons, Incorporated. Viitattu 28.04.2023. ISBN: 9781119035725.
- Das, J. C. 2017. Understanding symmetrical components for power system modeling. *IEEE Press Series on Power and Energy Systems*. Hoboken, New Jersey, Yhdysvallat: John Wiley and Sons Inc, IEEE Press. Viitattu 19.01.2023. ISBN: 1-119-22688-0.
- Elspec LTD. 2022. What is a Power Quality Analyzer? [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.01.2023]. Saatavissa: <https://www.elspec-ltd.com/what-is-a-power-quality-analyzer>.

Energiatallisuus. 2014. Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimi-tustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf.

Erickson, R. W. ja Maksimović, D. 2020. Fundamentals of Power Electronics. 3. painos. Cham, Sveitsi: Springer. Viitattu 25.11.2022. DOI: 10.1007/978-3-030-43881-4 ja ISBN: 978-3-030-43881-4.

Faiz, J., Ghorbanian, V. ja Joksimović, G. 2017. Fault Diagnosis of Induction Motors. Lontoo, Englanti, Yhdistynyt kuningaskunta: The Institution of Engineering and Technology. Viitattu 12.10.2022. ISBN: 978-1-5231-1239-5. Saatavissa myös e-kirjana: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpFDIM000T/fault-diagnosis-induction/fault-diagnosis-induction>.

Ferreira, F. J. T. E., Baoming, G. ja de Almeida, A. T. 2016. Reliability and Operation of High-Efficiency Induction Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 16.08.2016, Vol. 52 (6), 4628–4637. Viitattu 28.04.2023. DOI: 10.1109/TIA.2016.2600677.

Ferrero, A., Petri, D., Carbone, P. ja Catelani, M. 2015. Modern Measurements: Fundamentals and Applications. 1. painos. Hoboken, New Jersey, Yhdysvallat: John Wiley & Sons. Viitattu 17.01.2023. DOI: 10.1002/9781119021315 ja ISBN: 978-1-118-17131-8.

Francey, N. 1997. Instruction manual: TORQUEMASTER TM 200 SERIES. Fribourg, Sveitsi: Vibro-Meter SA. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.01.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://www.magtrol.com/wp-content/uploads/tm200manual.pdf>.

Gundogdu, T., Zhu, Z. G., Mipo, J. C. ja Personnaz, S. 2018. Influence of Rotor Skew on Rotor Bar Current Waveform and Performance in Induction Machines. Teoksessa: *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Jeju, Etelä-Korea, 07.–10.11.2018. IEEE. 525-530. Viitattu 29.11.2022. DOI: 10.23919/ICEMS.2018.8549245.

HBM. 2022. What is a Power Analyzer? Päivitetty 03.11.2022. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 05.01.2023]. Saatavissa: <https://www.hbm.com/en/8099/what-is-a-power-analyzer-definition>.

Holtz, J. 1994. Pulsewidth modulation for electronic power conversion. *Proceedings of the IEEE*, 08/1994, Vol. 82 (8), 1194–1214. Viitattu 09.01.2023. DOI: 10.1109/5.301684.

Hren, A. ja Mihalič, F. 2018. An Improved SPWM-Based Control with Over-Modulation Strategy of the Third Harmonic Elimination for a Single-Phase Inverter. *Energies (Basel)*, 10.04.2018, Vol. 11 (4), 881. Viitattu 09.01.2023. DOI: 10.3390/en11040881.

IEC 60050-551. 1998. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 551: Power electronics. 2. painos. Viitattu 04.01.2023. Viittauksen kohde saatavissa myös IEV Onlinesta: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=551-12-22>.

IEC 60751. 2008. Industrial platinum resistance thermometers and platinum temperature sensors. 2. painos. Viitattu 27.02.2023. ISBN 2-8318-9849-8.

IEEE Std 519. 2014. IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. Viitattu 17.01.2023. ISBN 978-0-7381-9006-8.

IEEE Std 1658-2011. 2012. IEEE Standard for Terminology and Test Methods of Digital-to-Analog Converter Devices. Viitattu 08.03.2023. ISBN: 978-0-7381-7147-0. DOI: 10.1109/IEEESTD.2012.6152113.

Iris Power. 2021. Motor Condition-Based Maintenance Solutions – Qualitrol Brochure. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.03.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://irispower.com/wp-content/uploads/2022/02/Motor-CBM-Solutions-Iris-Qualitrol-Brochure-V1-9-21.pdf>.

Jokela, K. 2006. Biosähkömagneetiikan fysikaalisia perusteita. Teoksessa: Nyberg, H. ja Jokela, K. (toim.). *Säteily- ja ydinturvallisuus -sarja, osa 6*. Hämeenlinna, Suomi: Karisto. 27-57. Viitattu 29.11.2022. URN:NBN:fi-fe2014120247337. Saatavissa myös PDF-muodossa: https://www.stuk.fi/documents/12547/494524/6_2.pdf/0b4cab0e-026b-4f36-a632-4f8f0efbe05d.

Joksimović, G. M., Riger, J., Wolbank, T. M., Peric, N. ja Vasak, M. 2013. Stator-Current Spectrum Signature of Healthy Cage Rotor Induction Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Syyskuu 2013, Vol. 60 (9), 4025–4033. Viitattu 20.09.2022. DOI: 10.1109/TIE.2012.2236995.

Joksimović, G., Kajević, A., Mujović, S., Dlabáč, T. Ambrožič, V. ja Tassarolo, A. 2019. Rotor bars skewing impact on electromagnetic pulsations in cage induction motor. Teoksessa: Popović, D. (toim.), Vukosavić, S. ja Lončar, B. (eds.), *Proceedings of Papers – 6th International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcETRAN*

2019, Srebrno Jezero, Serbia, 03.–06.06.2019, Belgrad: ETRAN Society & Academic Mind, 292–296. Viitattu 28.11.2022. ISBN: 987-86-7466-785-9. Saatavissa myös PDF-muodossa: https://etran.rs/2019/Proceedings_IcETTRAN_ETTRAN_2019.pdf.

Karmakar, S., Chattopadhyay, S., Mitra, M. ja Sengupta, S. 2016. Induction Motor Fault Diagnosis: Approach through Current Signature Analysis. Singapore: Springer Singapore. *Power Systems (POWSYS)*. Viitattu 18.10.2022. ISBN: 978-981-10-0624-1 DOI: 10.1007/978-981-10-0624-1.

Keithley. 2002. Integra Series – Model 2701: Ethernet-based Multimeter/Data Acquisition System. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.01.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: https://download.tek.com/document/2701_Brochure.pdf.

Lezana, P., Pou, J., Meynard, T. A., Rodriguez, J., Ceballos, S. ja Richardeau, F. 2010. Survey on Fault Operation on Multilevel Inverters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* (1982), Vol. 57 (7), 2207–2218. Viitattu 28.10.2022. DOI: 10.1109/TIE.2009.2032194.

Lindh, T. 2003. On the Condition Monitoring of Induction machines. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta. Viitattu 17.10.2022. Saatavissa: URN:ISBN:951-764-843-X.

Lindh, T. ja Partanen, J. 1999. Sähkökäyttöjen mittaavan kunnonvalvonnan menetelmiä. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. Sähkötekniikan osasto. Tutkimusraportti 4. ISBN: 951-764-315-2.

Miletic, A. ja Cettolo, M. 2003. Frequency Converter Influence on Induction Motor Rotor Faults Detection Using Motor Current Signature Analysis - Experimental Research. Teoksessa: *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2003. SDEMPED 2003*, Atlanta, Georgia, Yhdysvallat, 24.–26.10.2003. IEEE. Viitattu 16.11.2022. DOI: 10.1109/DEMPED.2003.1234559.

Nandi, S., Toliyat, H. A. ja Li, X. 2005. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 05.12.2005, Vol. 20 (4), 719–729. Viitattu 18.10.2022. DOI: 10.1109/TEC.2005.847955.

NSK Ltd. 1989. Rolling Bearings: CAT. No. E140b.

Omron Corporation. 2020. Motor Condition Monitoring Devices - K6CM series. Cat. No. N220-E1-07. 07.05.2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.03.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: https://www.omron-ap.com.my/data_pdf/cat/k6cm_n220-e1_1_8_csm1060685.pdf.

Omron Corporation. 2021. Starting Predictive Maintenance Small for a Sustainable Future of the Manufacturing Industry. *Latest trends in maintenance and examples of introduction of predictive maintenance*. 21.06.2021, Vol. 4. Cat. No. Y239-E1-01. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.03.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: https://www.omron-ap.com.my/data_pdf/cat/predictive_maintenance4_y239-e1-01.pdf.

Omron Corporation. 2022. K6CM Data Sheet. 01.04.2022. Cat. No. N218-E1-11. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 31.03.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: https://www.omron-ap.com.my/data_pdf/cat/k6cm_n218-e1_4_1_csm1060693.pdf.

Pyrhönen, J., Jokinen, T. ja Hrabovcova, V. 2014. Design of Rotating Electrical Machines. 2. painos. Somerset, Yhdistynyt kuningaskunta: John Wiley & Sons, Incorporated. Viitattu 23.02.2023. ISBN: 978-1-118-58157-5 (kirja) ja 978-1-118-70162-1 (e-kirja).

Pyrhönen, J., Hrabovcová, V. ja Semken, S. 2016. Electrical machine drives control: An introduction. 1. painos. Chichester, West Sussex, Yhdistynyt kuningaskunta: Wiley. Viitattu 10.02.2023. ISBN: 9781119260455 (kirja) ja 9781119260448 (e-kirja).

Rahman, M. M. ja Uddin, M. N. 2017. Online Unbalanced Rotor Fault Detection of an IM Drive Based on Both Time and Frequency Domain Analyses. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 06.04.2017, Vol. 53 (4), 4087–4096. Viitattu 21.02.2023. DOI: 10.1109/TIA.2017.2691736.

Rahman, M. F. ja Dwivedi, S. K. 2019. Modeling, Simulation and Control of Electrical Drives. Stevenage, Englanti, Yhdistynyt kuningaskunta: Institution of Engineering and Technology (The IET). Viitattu 04.01.2023. ISBN: 978-1-78561-587-0. Saatavissa myös e-kirjana: https://app.knovel.com/kn/resources/kpMSCED003/toc?issue_id=kt0123INV1.

Schaeffler Technologies AG & Co. KG. 2022. Schaeffler OPTIME: What is OPTIME and how does it work? [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.01.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/manualmountingoperation/downloads_7/optime_manual_de_en.pdf.

Silventoinen, P. ja Kuisma, M. 1999. Review on the Current Measurement systems in Power Electronics. Teoksessa: Martikainen, J. ja Eskelinen H., 1999, *Welding Conference Lut Join'99 : International Conference on Efficient Welding in Industrial Applications (ICE-WIA)*. Lappeenranta, Suomi, 25.–27.08.1999. Viitattu 16.01.2023. ISBN: 951-764-351-9. Saatavissa myös PDF-muodossa: https://www.researchgate.net/publication/265385066_Review_on_the_Current_Measurement_systems_in_Power_Electronics.

SKF. 2017. Bearing damage and failure analysis. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 28.02.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: https://www.skf.com/binaries/pub12/Images/0901d1968064c148-Bearing-failures---14219_2-EN_tcm_12-297619.pdf.

SKF. 2022a. 6206-2Z - Deep groove ball bearings | SKF. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.02.2023]. Saatavissa: <https://www.skf.com/uk/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6206-2Z>.

SKF. 2022b. 6205-2Z - Deep groove ball bearings | SKF. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.02.2023]. Saatavissa: <https://www.skf.com/my/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-6205-2Z>.

SKF. 2023. Angular contact ball bearings. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.05.2023]. Saatavissa: <https://www.skf.com/my/products/rolling-bearings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings>.

Takahashi, D. 2019. Fast Fourier Transform Algorithms for Parallel Computers. 1. painos. Singapore: Springer Singapore. Viitattu 09.11.2022. ISBN: 978-981-13-9965-7. Saatavissa myös e-kirjana: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-13-9965-7>.

Yokogawa. 2009. Zero-fluxTM Current Sensors & Precision power meters: Hitec & Yokogawa – A perfect ACCURACY match.

Yokogawa. 2014. Specifications: PX8000 Precision Power Scope. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.01.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/BUPX8000-02EN.pdf>.

Yokogawa. 2017. PX8000 Precision Power Scope User's Manual: Features Guide. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 27.02.2023]. Saatavissa PDF-muodossa: <https://cdn.tmi.yokogawa.com/IMPX8000-01EN.pdf>.

Liite 1. Vikojen vauriotaajuuksia.

Taulukossa A1.1 on esitetty taajuuksia, joilla esiintyy eri vikojen vuoksi yliaaltokomponenttien amplitudien nousua.

Taulukko A1.1. Eri vikojen aiheuttamien yliaaltokomponenttien esiintymistaajuuksia eri havainnointimenetelmillä (Lindh & Partanen 1999).

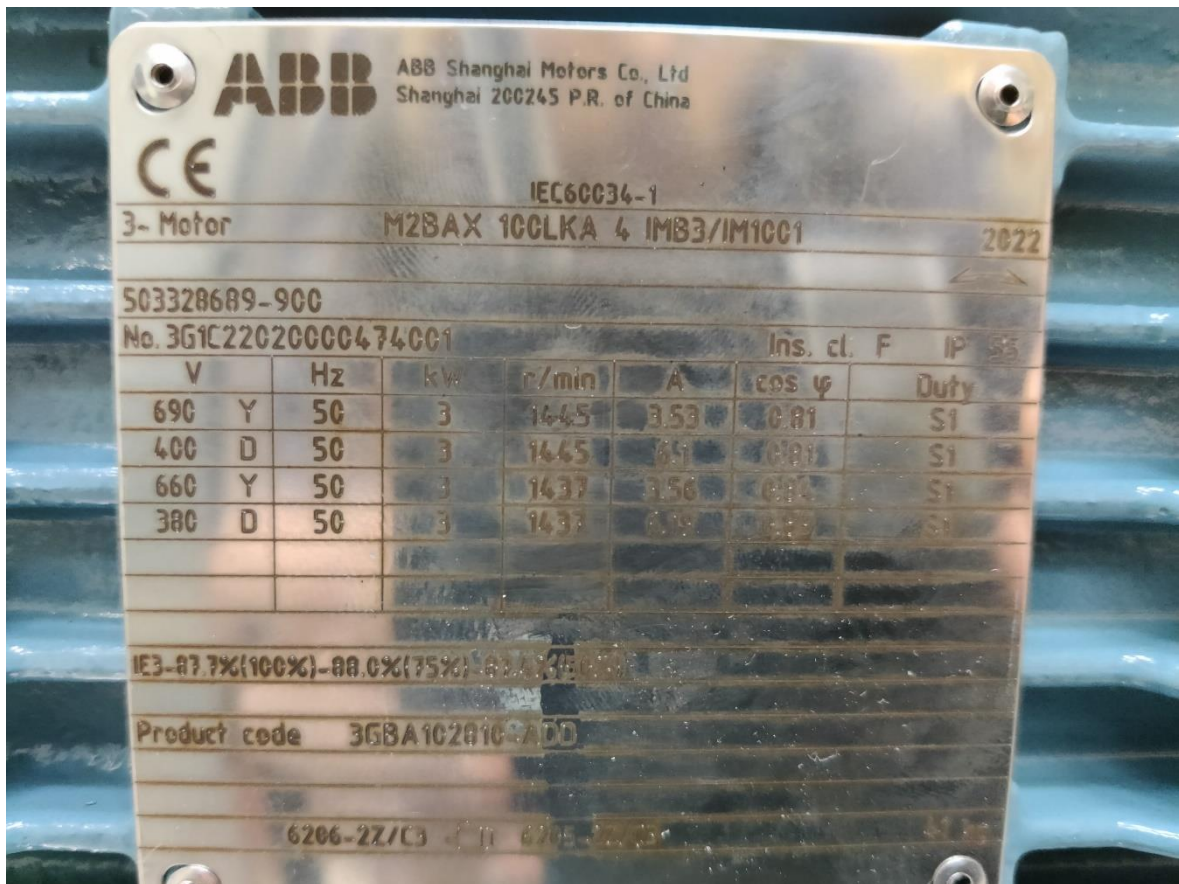
Vika	Staattorivirta	Pyörimisnopeus, vääntömomentti	Tärinä	Aksiaalivuo
Käämisulku	Vastakomponentti, epäsymmetria		$f, 2f$	f
Syöttöjohdin katkennut	epäsymmetria, f_s			$2f, 4f$
Epäsymmetrinen syöttö	Vastakomponentti, epäsymmetria		$2f$	$2f, 4f$
Laakerin sisäkehä	$f_s + m \frac{N_{bb}}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{bb}}{d_{bp}} \cos \alpha\right)$		$\frac{N_{bb}}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{bb}}{d_{bp}} \cos \alpha\right)$	
Laakerin ulkokehä	$f_s + m \frac{N_{bb}}{2} f_r \left(1 - \frac{d_{bb}}{d_{bp}} \cos \alpha\right)$		$\frac{N_{bb}}{2} f_r \left(1 - \frac{d_{bb}}{d_{bp}} \cos \alpha\right)$	
Laakerin vierintäelin			$\frac{d_{bp}}{2d_{bb}} f_r \left(1 - \left(\frac{d_{bb}}{d_{bp}} \cos \alpha\right)^2\right)$	
Laakerin separaattorirengas			$\frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{d_{bb}}{d_{bp}} \cos \alpha\right)$	
Roottorisauvan vaurioituminen	$f_s \pm 2sf_s$ $f_{stt}[Q_r(1-s)/p \pm k] \pm 2sf_{stt}$	$2sf$	$f \pm 2sf$	$2f, 3f, 4f$
Roottorin staattinen epäkeskisyyden	$f_s \pm f_r$			$f(1 \pm s)$
Roottorin dynaaminen epäkeskisyyden	$f_s \pm f_r$ $f_{stt}[k(1-s)/p \pm 1]$		$f[k(Q_r \pm 1)(1-s)/p \pm 2k],$ $f_r, 2f_r$	$f(1 \pm s)$
Roottorin staattinen ja dynaaminen epäkeskisyyden	$f_{stt}[(kQ_r \pm n_d)(1-s)/p \pm v]$		$f[k(Q_r \pm 1)(1-s)/p \pm 2k],$ $f_r, 2f_r$	

Liite 2. Mittauksissa käytettyjen oikosulkumoottorien tyyppikilvet

Taulukossa A2.1 on esitetty mittauksissa käytetyn ABB:n oikosulkumoottorin tyyppikilven arvot ja kuvassa A2.1 on esitetty tyyppikilpi, josta arvot ovat peräisin.

Taulukko A2.1. Mittauksissa voimakoneena käytetyn moottorin tyyppikilven arvot. Tyyppikilpi on myös nähtävillä kuvassa A2.1.

3~ Motor		M2BAX 100LKA 4 IMB3/IM1001				2022	
503328689-900							
No. 3G1C22020000474001					Ins. cl. F	IP 55	
V	Hz	kW	r/min	A	cos φ	Duty	
690 Y	50	3.0	1445	3.53	0.81	S1	
400 D	50	3.0	1445	6.10	0.81	S1	
660 Y	50	3.0	1437	3.56	0.84	S1	
380 D	50	3.0	1437	6.19	0.83	S1	
IE3 87.7 % (100 %) – 88.0 % (75 %) – 87.4 % (50 %)							
Product code 3GBA102810 ADD							
6206-2Z/C3 – 6205-2Z/C3							
						41 kg	



Kuva A2.1. Mittauksissa voimakoneena käytetyn moottorin tyyppikilpi. Kuvassa näkyvät arvot löytyvät myös taulukosta A2.1.

Taulukossa A2.2 on esitetty mittauksissa käytetyn ABB:n oikosulkumoottorin tyyppikilven arvot ja kuvassa A2.2 on esitetty tyyppikilpi, josta arvot ovat peräisin.

Taulukko A2.2. Mittauksissa kuormakoneena käytetyn moottorin tyyppikilven arvot. Tyyppikilpi on myös nähtävillä kuvassa A2.2.

3~ Motor	M2BA 100LKA 4 IMB3/IM1001	Cl. F	IP 55
3GBA132323-ADB			IM 1001
Sr. No. 637633			
V	Hz	r/min	kw
690 Y	50	1450	7.5
400 D	50	1450	7.5
415 D	50	1460	7.5
IE2-89.3 (100 %) – 90.1 (75 %) – 90.0 (50 %)			
6208-2Z/C3 – 6208-2Z/C3			73 kg
IEC 60034-1			

ABB

3 ~ Motor M3BA 132 MB-4 IE2 CE
 Cl. F IP 55

3GBA132323-ADB M 1001

Sr. No. 6 3 7 6 3 3

V	Hz	r/min	kw	A	Cos φ
690 Y	50	1450	7.5	8.6	0.81
400 D	50	1450	7.5	14.9	0.81
415 D	50	1460	7.5	14.7	0.79

IE 2-89.3 (100%) - 90.1 (75%) - 90.0 (50%)

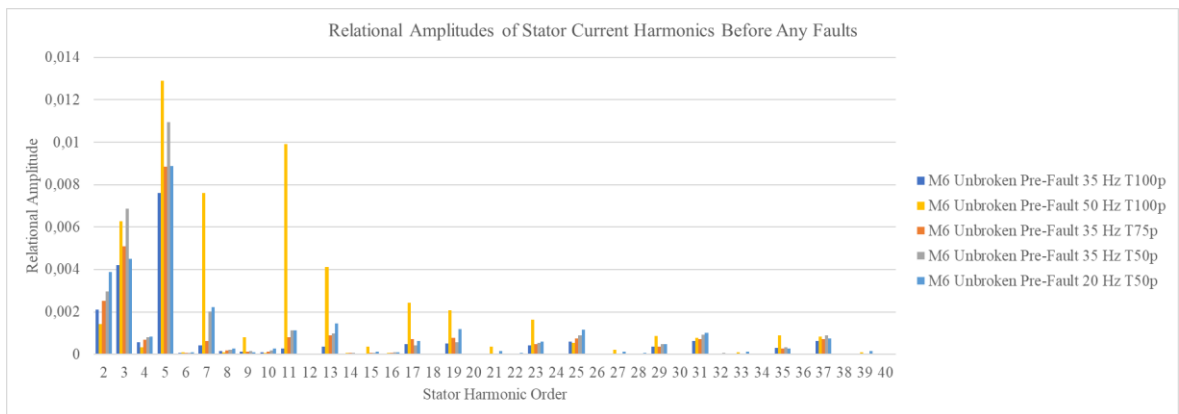
6208-2Z/C3 6208-2Z/C3 75 kg

IEC 60034-1

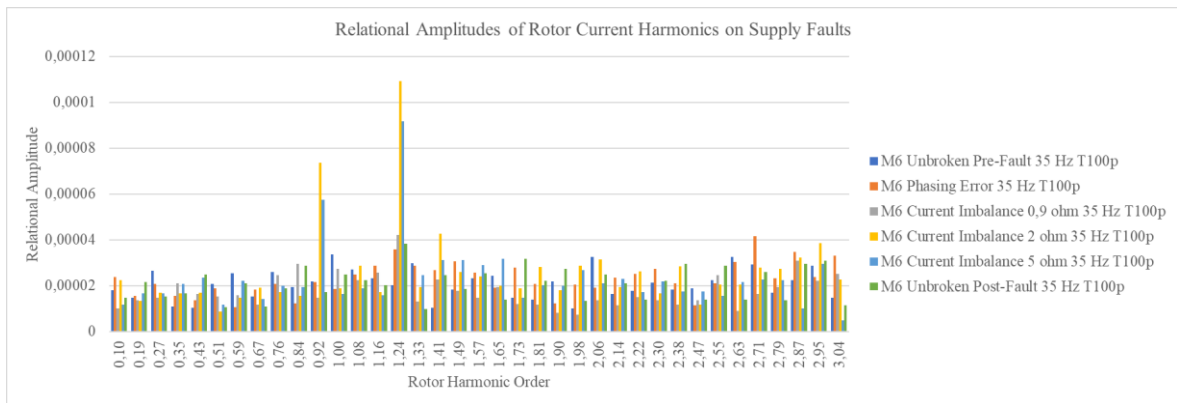
Kuva A2.2. Mittauksissa kuormakoneena käytetyn moottorin tyyppikilpi. Kuvassa näkyvät arvot löytyvät myös taulukosta A2.2.

Liite 3. Työssä esittämättömiä mittaustuloksia.

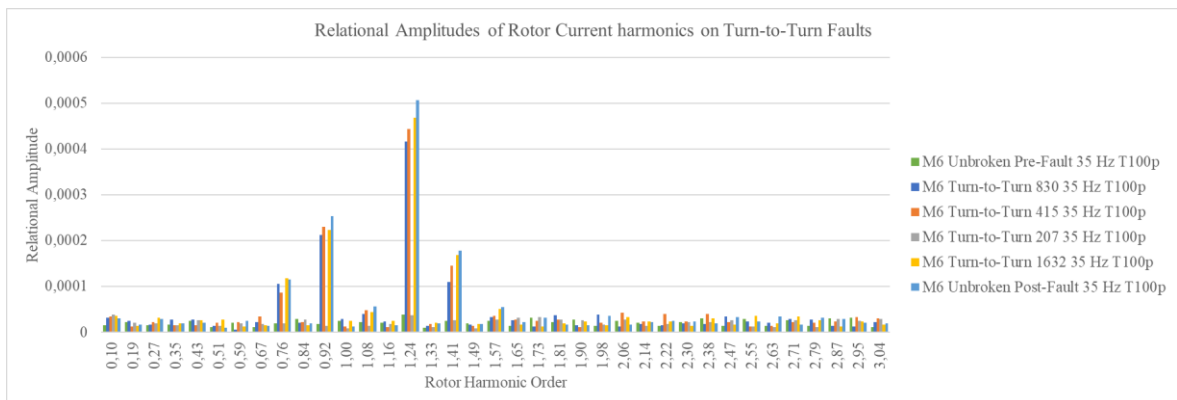
Kuvissa A3.1 - A3.7 on esitetty moottorien mitattujen vaihevirtojen yliaaltosisältöä kuvaavia kuvaajia eri vikojen kanssa ja eri toimintapisteissä. Kuviin on valittu esitettäväksi vain päätaajuuden monikerrat.



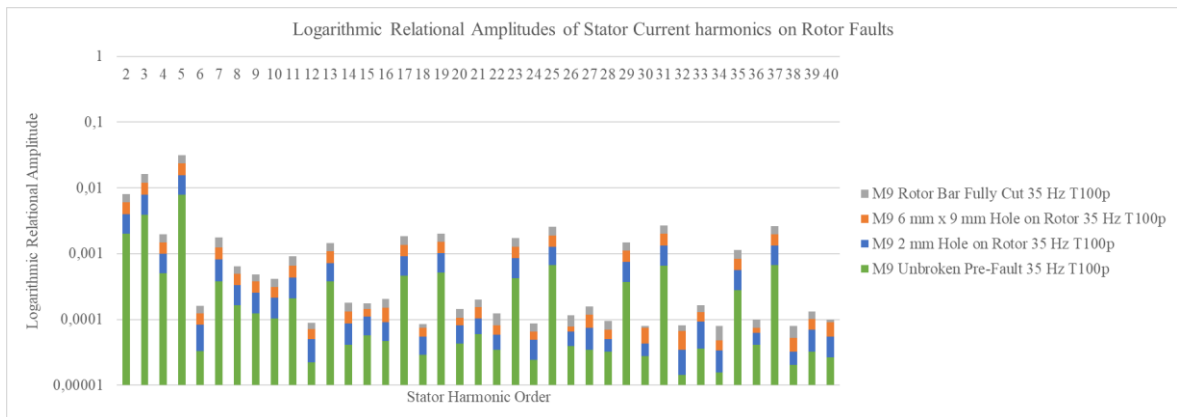
Kuva A3.1. Ehjästä moottorista eri toimintapisteissä mitattujen vaihevirtojen harmonisien komponenttien amplitudit. Amplitudit on skaalattu jakamalla niiden arvot pääaallon amplitudin arvolla.



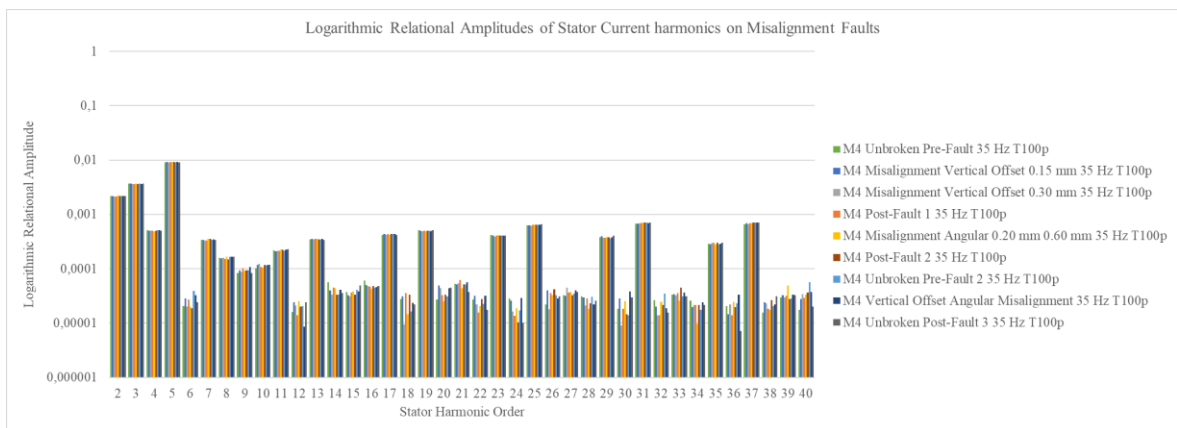
Kuva A3.2. Syöttövikaisesta moottorista eri toimintapisteissä mitattujen vaihevirtojen harmonisien komponenttien amplitudit. Amplitudit on skaalattu jakamalla niiden arvot pääaallon amplitudin arvolla.



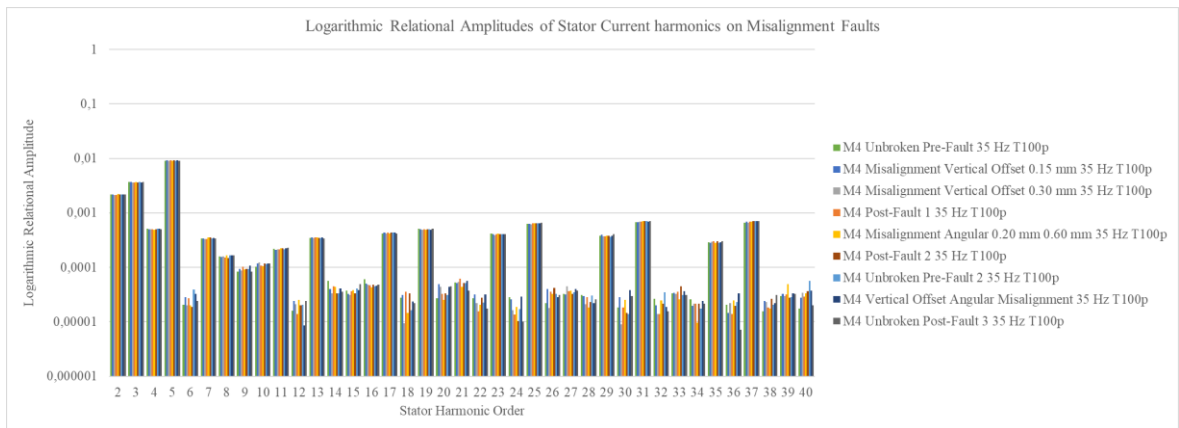
Kuva A3.3. Staattorikäimin emuloidusti kierrossulkuvikaisesta moottorista eri toimintapisteissä mitattujen vaihevirtojen harmonisien komponenttien amplitudit. Amplitudit on skaalattu jakamalla niiden arvot pääaallon amplitudin arvolla.



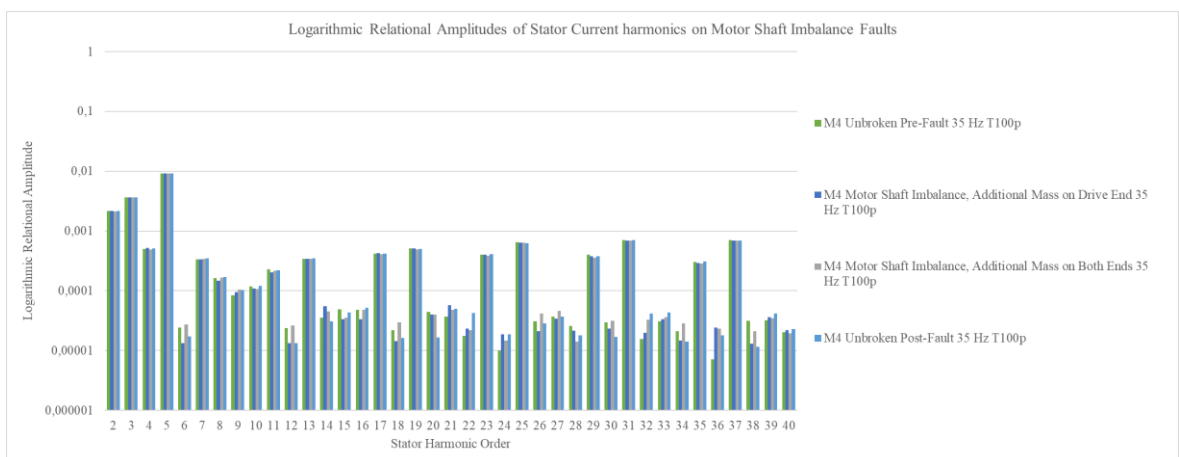
Kuva A3.4. Roottorivikaisesta moottorista eri toimintapisteissä mitattujen vaihevirtojen harmonisien komponenttien amplitudit. Amplitudit on skaalattu jakamalla niiden arvot pääaallon amplitudin arvolla ja ne on esitetty logaritmisella asteikolla.



Kuva A3.5. Linjausvirheellisestä moottorista eri toimintapisteissä mitattujen vaihevirtojen harmonisien komponenttien amplitudit. Amplitudit on skaalattu jakamalla niiden arvot pääaallon amplitudin arvolla.

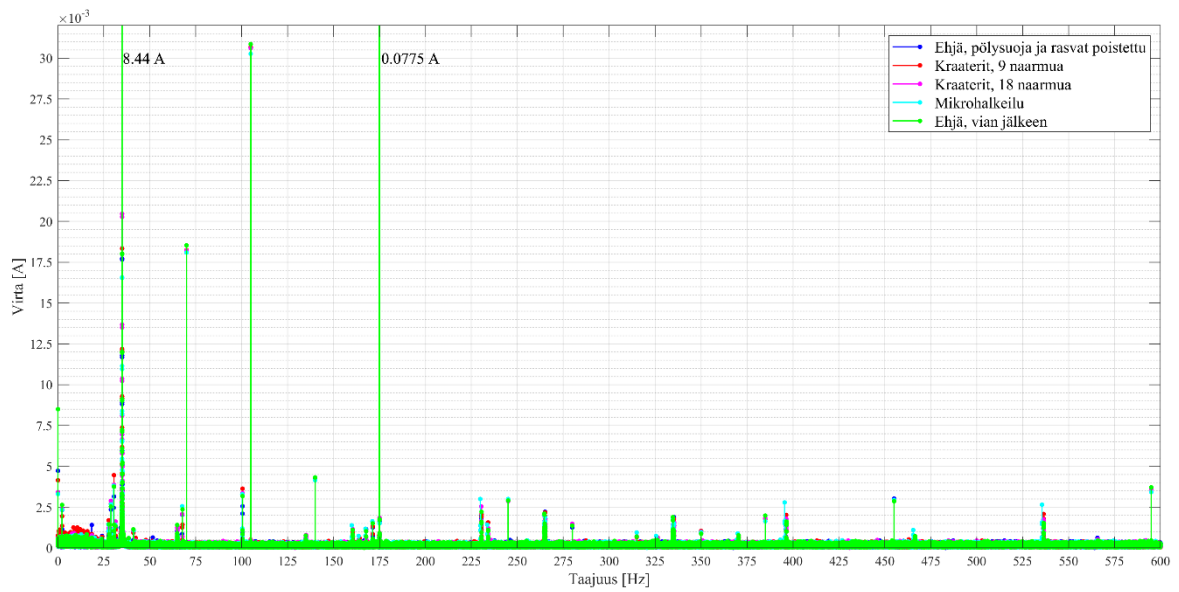


Kuva A3.6. Linjausvirheellisestä moottorista eri toimintapisteissä mitattujen vaihevirtojen harmonisien komponenttien amplitudit. Amplitudit on skaalattu jakamalla niiden arvot pääaallon amplitudin arvolla ja ne on esitetty logaritmisella asteikolla.

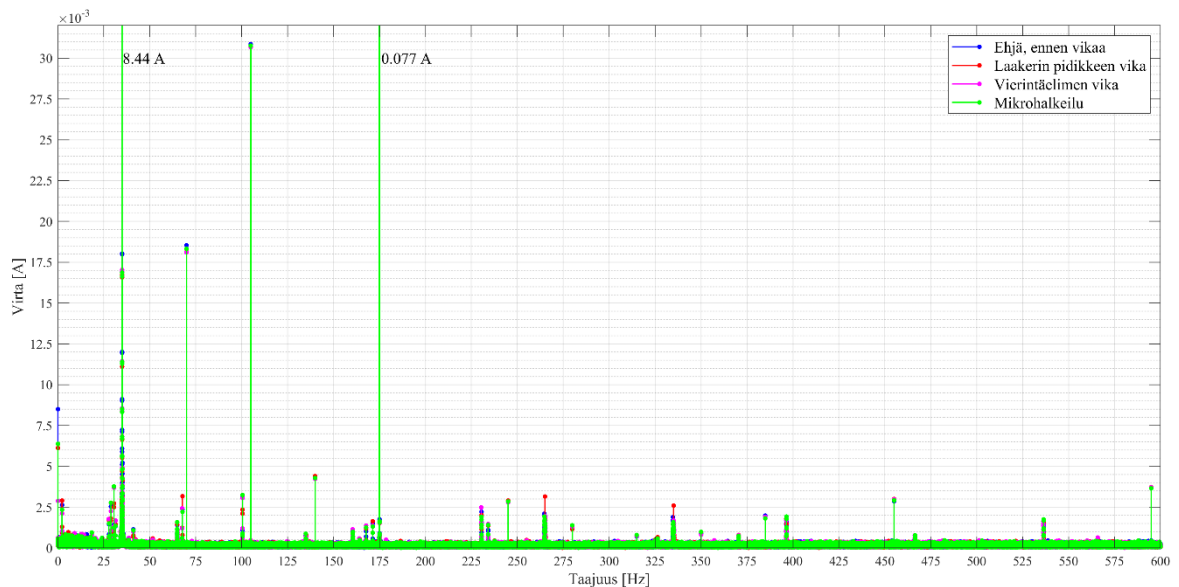


Kuva A3.7. Akselin epätasapainovikaisesta moottorista eri toimintapisteissä mitattujen vaihevirtojen harmonisien komponenttien amplitudit. Amplitudit on skaalattu jakamalla niiden arvot pääaallon amplitudin arvolla.

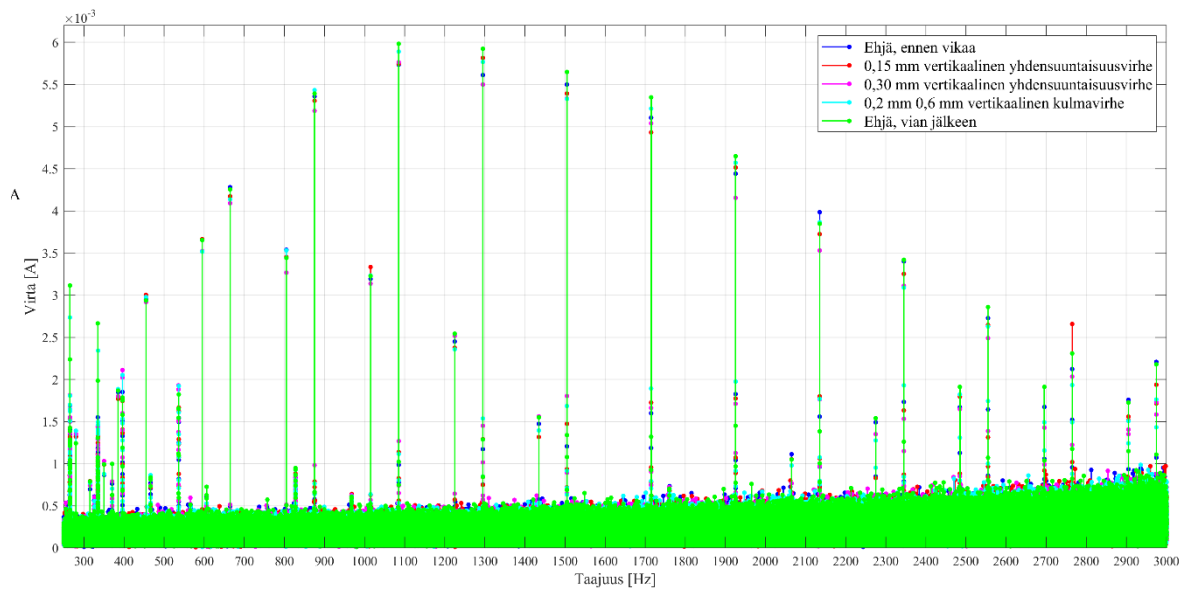
Kuvissa A3.8 - A3.12 on esitetty moottorien mitattujen vaihevirtojen yliaaltosisältöä kuvaavia kuvaajia eri vikojen kanssa ja eri toimintapisteissä. Kuvissa on esitetty vaihevirtojen yliaaltosisältöä eri taajuusalueilla.



Kuva A3.8. Syöttövirran taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 600 Hz sekä ehjällä moottorilla, että moottorilla, johon on toteutettu eri laakerivikoja. Kuvan selitteessä kraattereilla viitataan laakeriin tehtyihin pyykkilautajälkiin. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

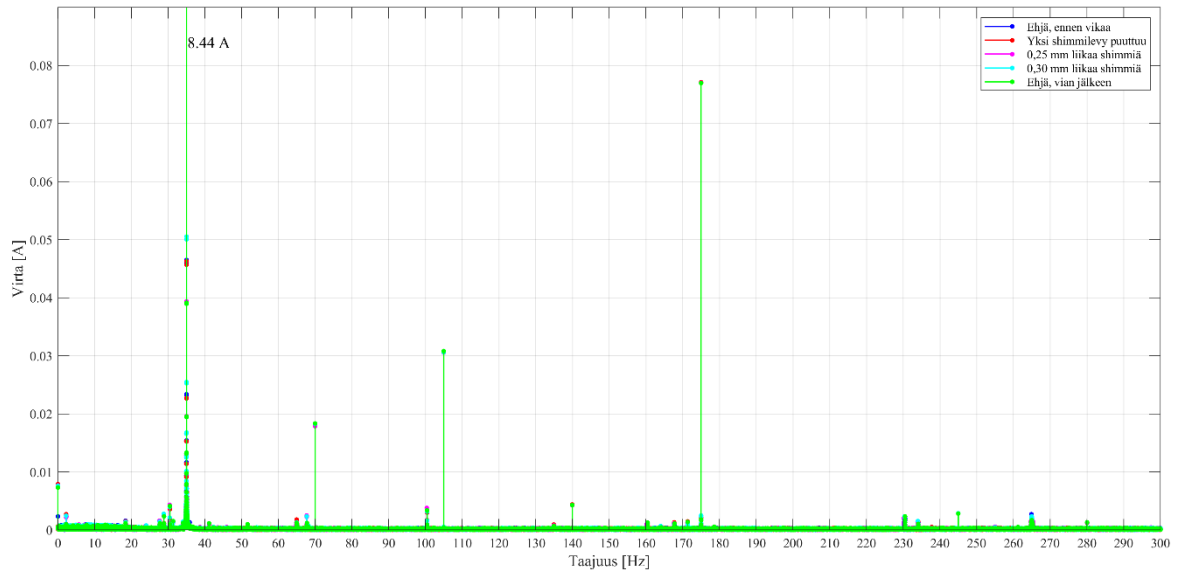


Kuva A3.9. Syöttövirran taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 600 Hz sekä ehjällä moottorilla, että moottorilla, johon on toteutettu eri laakerivikoja. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.



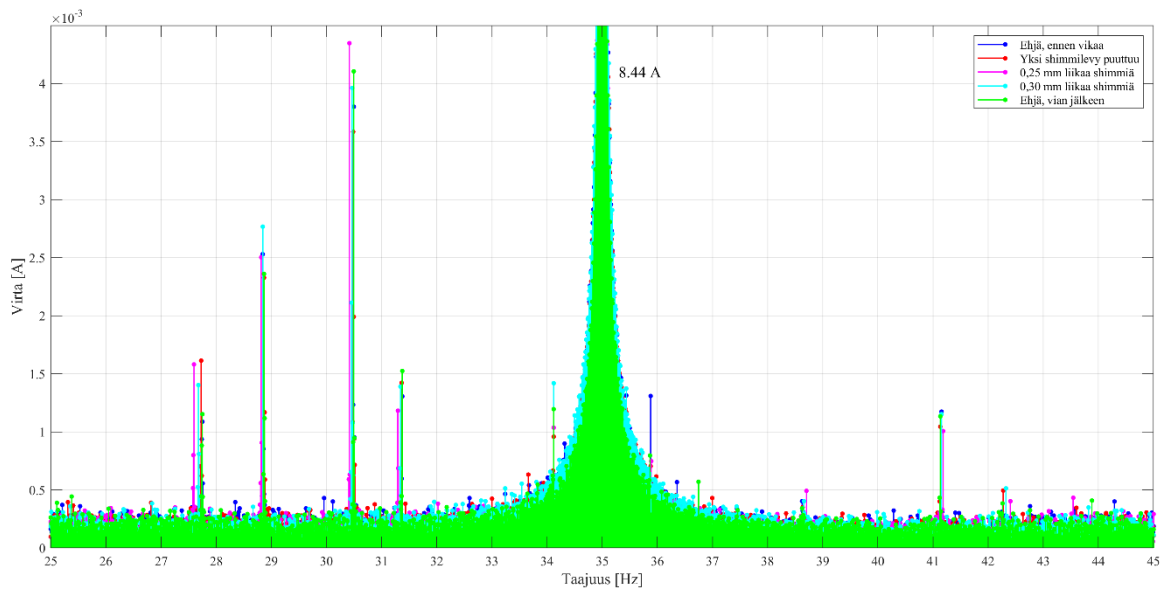
Kuva A3.10. Syöttövirran taajuuskomponentit taajuuksilta 250 Hz ... 3000 Hz sekä ehjällä moottorilla, että vertikaalisuunnassa väärin linjatusta moottorista. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvassa A3.11 on esitetty epätasapainoisesti kiinnitetyn moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 300 Hz verrattuna oikein kiinnitetyn moottorin taajuuskomponentteihin. Kaikki edellä mainitut vian vakavuusasteet on esitetty kuvassa eri mittauspisteinä.



Kuva A3.11. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 0 Hz ... 300 Hz sekä oikein kiinnitetyllä moottorilla, että moottorilla, jonka yhden jalan kiinnitys aiheuttaa epäta-sapainoa. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

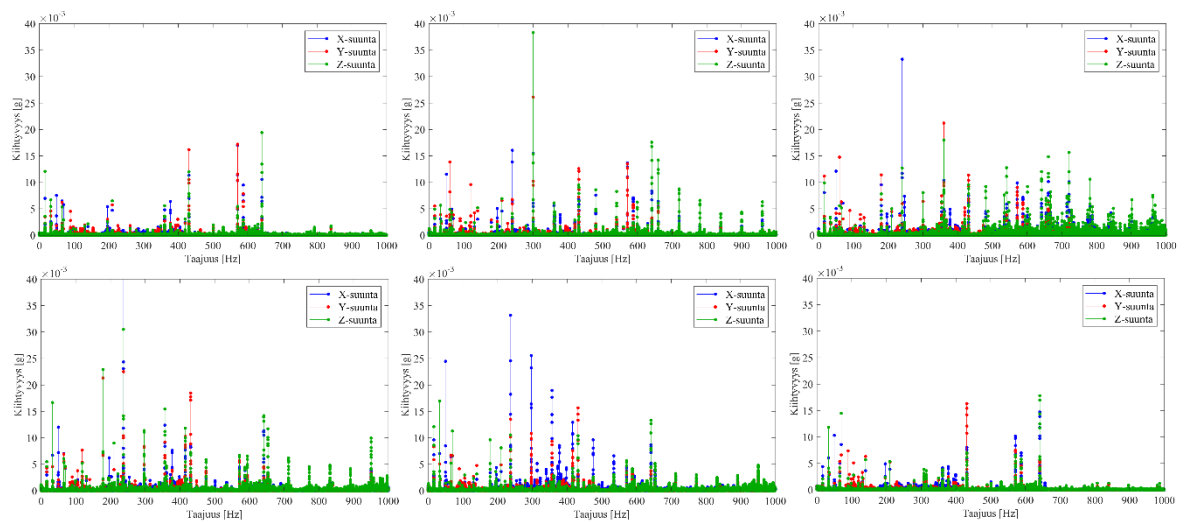
Kuvasta A3.11 nähdään, että merkittävää eroa ei eri vikojen välillä taajuuskomponenttien amplitudeissa ole nähtävissä. Kuvassa A3.12 on puolestaan esitetty samat komponentit samoista mittauspisteistä, mutta taajuuksilta 25 Hz ... 45 Hz.



Kuva A3.12. Moottorin vaihevirtojen taajuuskomponentit taajuuksilta 25 Hz ... 45 Hz sekä oikein kiinnitetyllä moottorilla, että moottorilla, jonka yhden jalan kiinnitys aiheuttaa epäta-sapainoa. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

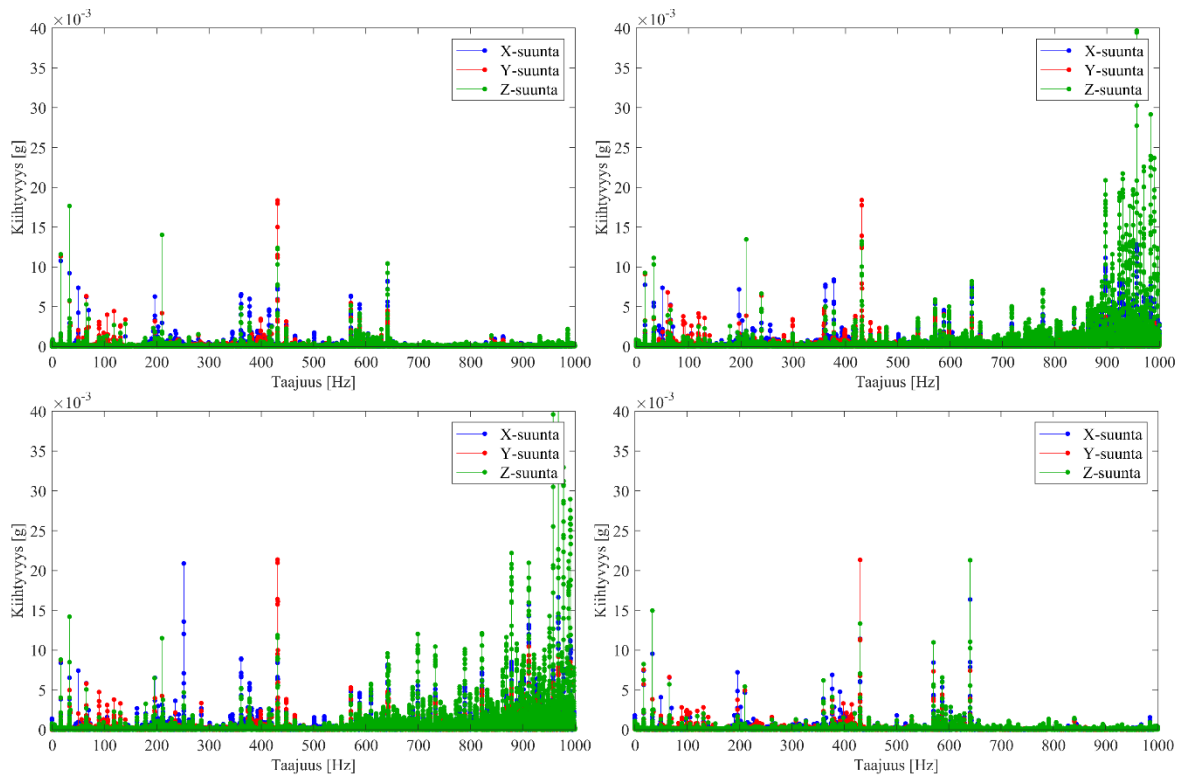
Kuvasta A3.12 nähdään, että pieniä muutoksia onkin havaittavissa. Taajuudella 27,6 Hz näyttäisi vika saavan aikaan sen, että taajuuskomponenttien amplitudit hiukan nousevan ver-rattuna ehjän moottorin amplitudeihin. Samoin taajuudella 30,5 Hz on linjausvirhe 0,25 mil-limetrin paksuisella kerroksella sovitelevyjä nostanut taajuuskomponenttien amplitudia oi-kein linjattuihin moottoreihin nähden, kun taas yhden sovitelevyn pois jättäminen on laske-nut samojen komponenttien amplitudeja.

Väriämittausten tuloksia, joita ei esitetty itse työssä, on esitetty kuvassa A3.13. Kuvassa on esitetty moottorin värinän taajuussisältö ehjästä moottorista ja moottorista, jonka laakereiden ulkokehille on porattu reikä. Toimintapisteenä on kaikissa kuvissa 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma nimelliseen vääntömomenttiin nähden. Kuvassa A3.14 taas on esitetty väri-nän taajuussisältö, kun moottorin käyttöakselin puoleista laakeria on naarmutettu sekä sisä-että ulkokehältä.



Kuva A3.13. Moottorin värinän taajuussisältö taajuuksilta 0 Hz ... 1 kHz sekä ehjällä moottorilla, että laakerivikaisella moottorilla, jonka laakereiden ulkokehiin on vuorotellen porattu reikä. Vasemmalta oikealle ja ylhäältä alaspäin lueteltuna ensimmäisenä on ehjä moottori, toisena on tuulettimen puoleisen laakerin ulkokehällä 2,2 mm halkaisijallinen reikä, kolmannessa tuulettimen puoleisen laakerin ulkokehällä 3,2 mm halkaisijallinen reikä, neljännessä käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehällä 2,2 mm halkaisijallinen reikä alaspäin suunnattuna, viidennessä käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehällä 2,2 mm halkaisijallinen reikä sivusuuntaan suunnattuna ja viimeisessä ehjä moottori vian poistamisen jälkeen. Toimintapisteinä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvan A3.13 perusteella moottorin tuulettimen puoleisen laakerin ulkokehän viat aiheuttavat taajuudella 60,1 Hz värinän amplitudin nousua. Käyttöakselin puoleisen laakerin ulkokehän viat taas vaikuttavat kasvattavan värinän amplitudeja ainakin 33,2 Hz, 49,8 Hz ja 237,8 Hz taajuuksilla. Tämän perusteella värinän taajuussisältö vaikuttaisi vaihtelevan sen mukaan, kummassa laakerissa vika on.



Kuva A3.14. Moottorin värinän taajuussisältö taajuuksilta 0 Hz ... 1 kHz sekä ehjällä moottorilla, että laakerivikaisella moottorilla, jonka käyttöakselin puoleisen laakerin ulko- ja sisäkehää on naarmutettu. Vasemmalta oikealle ja ylhäältä alaspäin lueteltuna ensimmäisenä on ehjä moottori, toisena on moottori, jonka laakerin ulkokehää on naarmutettu, kolmantena moottori, jonka laakerin sisäkehää on naarmutettu ja viimeisessä ehjä moottori vian poistamisen jälkeen. Toimintapisteenä on 35 Hz syöttötaajuus ja 100 % kuorma.

Kuvan A3.14 perusteella taulukon 3.8 laskennallisilla taajuuksilla ei ollut suurta muutosta värähtelyjen amplitudeissa moottorin laakerin sisä- eikä ulkokehän ollessa naarmutettuna. Sen sijaan ulkokehän naarmuttaminen nosti värähtelyn amplitudeja mm. 957 Hz taajuudella ja sisäkehän naarmuttaminen puolestaan näkyi taajuuksilla 252 Hz ja 968 Hz.