



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Emilia Hansten

Oikosulkumoottorin oikosulkutesti alennetulla jännitteellä ilman akselin lukitusrautaa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Sähkötekniikan diplomityö
Energia- ja informaatiotekniikka, DI

Vaasa 2023

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö

Tekijä:	Emilia Hansten		
Tutkielman nimi:	Oikosulkumoottorin oikosulkutesti alennetulla jännitteellä ilman akselin lukitusrautaa		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Sähkötekniikka		
Työn ohjaaja:	Jari-Pekka Avantola		
Työn valvoja:	Timo Vekara		
Työn tarkastaja:	Jere Kolehmainen		
Valmistumisvuosi:	2023	Sivumäärä:	92+7

TIIVISTELMÄ:

Oikosulkutesti tehdään tuotantolinjalla jokaiselle oikosulkumoottorille toiminnan ja laadun varmistamiseksi. Oikosulkutesti suoritetaan alennetulla jännitteellä, joka valitaan yleensä siten, että moottorille syötetty virta vastaa moottorin laskelman mukaista nimellisvirtaa. Perinteisesti moottorin akseli lukitaan testin ajaksi lukitusraudalla. Kun moottorin pyöriminen on estetty, oikosulkumoottori vastaa toiminnaltaan muuntajaa, jonka toisio on oikosulussa. Oikosulkutestistä saadaan selville moottorin virtalämpöhäviöt, oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi. Diplomityön tarkoituksena on tutkia uudenlaista oikosulkutestin testausmenetelmää, jossa oikosulkumoottorin akselia ei lukita eikä testissä käytetä ulkoista kuormaa. Mittaukset suoritetaan oikosulkumoottorin käynnistysvaiheessa, kun moottoria syötetään alijännitteellä.

Diplomityö toteutettiin Vaasassa ABB oy:lle, ja tutkimusta varten suoritettiin mittauksia kahdelle oikosulkumoottorille IEC LV Motors -tehtaan rutiinitestipaikalla. Työssä tutkitaan, miten oikosulkuvirta ja jännite voidaan mitata ja laskea oikosulkumoottorilta, jonka akselia ei olekaan lukittu ja millä ajanhetkellä mittaus tulisi suorittaa. Uudenlaisen testausmenetelmän luotettavuutta ja sovellettavuutta arvioidaan kerätyn mittausdatan perusteella. Lisäksi tarkoituksena on kartoittaa, voidaanko nykyisillä käytössä olevilla mittalaitteilla tunnistaa roottorisauvavikoja ilman lukitusrautaa suoritettavalla oikosulkutestillä.

Työssä testattaville moottoreille suoritettiin oikosulkutestit sekä lukitusraudalla että ilman lukitusrautaa. Ensimmäisten oikosulkutestien jälkeen kummallekin testimoottorille aiheutettiin roottorivika poraamalla yksi roottorisauvoista poikki. Oikosulkutestit toistettiin vioitetuille moottoreille, ja tuloksia verrataan keskenään. Oikosulkutestin mittauksiin käytettiin rutiinitestipaikan testilaitteistoon kuuluvaa tehoanalyysointia sekä oskilloskooppia, jolla oli suurempi näytteenottotajuuus. Tällä tavoin pyritään varmistamaan, että tehoanalyysointin mittaustarkkuus on riittävän hyvä. Oskilloskoopin mittaamasta virrasta muodostetaan myös perustajajuu-den spektri. Spektrin perusteella ei kuitenkaan voitu yksiselitteisesti nähdä vikaa käynnistysheikkellä.

Tätä diplomityötä varten suoritetuissa mittauksissa havaitaan, että syöttöjännite ja moottorin napaluku vaikuttavat testattavan moottorin muutosilmion ajalliseen keston. Diplomityön perusteella voidaan todeta, että ilman lukitusrautaa tehtävä oikosulkutesti soveltuu runkokooltaan isojen moottoreiden testaukseen. Roottorisauvan vian tunnistaminen hitaasti pyörivästä oikosulkumoottorista on kuitenkin haasteellista ilman kuormaa ja pienen jättämän vuoksi, ja se vaatii nykyistä tarkempia signaalinkäsittelymenetelmiä.

AVAINSANAT: oikosulkumoottori, oikosulkutesti, alennettu jännite, roottorivika

UNIVERSITY OF VAASA**School of Technology and Innovations**

Author:	Emilia Hansten		
Title of the Thesis:	Short-circuit test of induction motors at reduced voltage without locking rotor		
Degree:	Master of Science in Technology		
Major:	Electrical Engineering		
Instructor:	Jari-Pekka Avantola		
Supervisor:	Timo Vekara		
Evaluator:	Jere Kolehmainen		
Year:	2023	Pages:	92+7

ABSTRACT:

Short-circuit test is done to all induction motors at a reduced voltage at production line to ensure proper operation and quality. The voltage used is calculated so that the supply current usually corresponds to the rated current of the motor. Traditionally, the shaft of the motor is locked during short-circuit test. While the rotor cannot rotate, the induction motor acts like a transformer that has its secondary coil short-circuited. The thermal losses of current, short-circuit resistance and reactance of the motor can be found from the short-circuit test. The aim of this thesis is to research a new test method where the induction motor's rotor is not locked, and external load is not used. Short-circuit measurements are conducted at a reduced voltage during start-up.

This thesis is written for ABB oy and two induction motors were tested at a routine test place in IEC LV Motors factory in Vaasa. The aim of this thesis is to answer how short-circuit current and voltage can be determined from short-circuit test without locked rotor shaft. The reliability and applicability of the new test method is assessed based on measured data. In addition, the aim is to examine if rotor bar faults can be detected with this new test method and the existing measurement devices.

In this thesis, the motors were short-circuit tested with and without a locked rotor. After the first set of tests, one rotor bar of each test motor was intentionally broken by drilling a radial hole to the rotor. Short-circuit tests were repeated to the faulty motors, and the test results were compared. Measurements were conducted with a power analyzer that is part of the existing test setup, and with an oscilloscope that had a higher sampling frequency. The aim of this comparison is to ensure that the measurement accuracy of the power analyzer is adequate. Oscilloscope is used to form a spectrum of current's fundamental frequency. However, the faults could not be unequivocally determined from the spectrum during start-up.

Results show that the supply voltage and the number of poles of the motor affect the transient time of the test motor's current. Short-circuit test without locked rotor is a suitable method for large induction motors. However, detecting rotor bar faults from slowly rotating rotor is challenging due to no load conditions, and changing slip. Detecting rotor faults would require more advanced signal processing methods compared to existing ones.

KEYWORDS: induction motor, short-circuit test, reduced voltage, rotor fault

Sisällys

1	Johdanto	13
1.1	Työn tarkoitus	14
1.2	Työn rajaus	16
2	Testipaikan rakenne	18
2.1	Testipaikan muuntajat	18
2.2	Testipaikan ohjaus- ja valvomolaitteet	19
2.3	Testipaikan tehoanalysointori ja MotTest	20
3	Perinteinen oikosulkutesti lukitusraudalla ja alennetulla jännitteellä	21
4	Uuden mittausmenetelmän teoria	26
5	Roottorin vikojen tunnistaminen rutiinitestissä	30
5.1	Roottorin vika-analyysimenetelmät	33
5.2	Virran vikasignaali	35
5.3	Vikojen ilmeneminen tehoanalysointorilla suoritetuissa mittauksissa	38
6	Uudenlaisen mittausmenetelmän luotettavuus	40
7	Ehjän oikosulkumoottorin testaus AL2A-rutiinitestipaikalla	47
7.1	Ehjä 2-napainen oikosulkumoottori	49
7.2	Ehjä 6-napainen oikosulkumoottori	56
8	Roottorivikaisen moottorin testaus AL2A-rutiinitestipaikalla	64
8.1	Roottorivikainen 2-napainen oikosulkumoottori	66
8.2	Roottorivikainen 6-napainen oikosulkumoottori	70
9	Oikosulkutestin mittausdatan käsittely ja analyysi	75
9.1	Mittausajankohdan ja -aikavälin määrittämiseen vaikuttavat tekijät	77
9.2	Mittaustulosten muodostaminen mittausnäytteistä	79
9.3	Rikkinäisen roottorisauvan vaikutus mittauksille	84
10	Johtopäätökset	86
	Lähteet	89
	Liitteet	93

Liite 1. Testauskeskuksen AL2A periaatekaavio.	93
Liite 2. Tektronix 4 Series MSO44 -oskilloskoopin tekniset tiedot.	94
Liite 3. Fluke i410 AC/DC -virtapihdin tekniset tiedot.	95
Liite 4. Teledyne LeCroy HDO6054 -oskilloskoopin tekniset tiedot.	96
Liite 5. LeCroy WaveSurfer 44Xs -oskilloskoopin tekniset tiedot.	97
Liite 6. Fluke i1000s -virtapihdin tekniset tiedot.	98
Liite 7. Fluke 80i-1000s -virtapihdin tekniset tiedot.	99

Kuvat

Kuva 1. Oikosulkumoottori akseli lukittuna.	23
Kuva 2. Muutostilan virran kuvaaja, kun moottori on 6-napainen.	27
Kuva 3. Muutostilan jännitteen kuvaaja, kun moottori on 6-napainen.	28
Kuva 4. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin vaihevirrät oskilloskoopilla mitattuna lukitusraudalla suoritettussa oikosulkutestissä.	43
Kuva 5. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oskilloskoopilla mitattuna lukitusraudalla suoritettussa oikosulkutestissä.	43
Kuva 6. Ehjän 2-napaisen moottorin vaihevirrät oskilloskoopilla mitattuna ilman lukitusrauta suoritettussa oikosulkutestissä.	44
Kuva 7. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oskilloskoopilla mitattuna ilman lukitusrauta suoritettussa oikosulkutestissä.	45
Kuva 8. 2-napaisen oikosulkumoottorin oikosulkuvirrät ajanhetkellä $t = 1,5$ s 58 V, 59 V, 60 V, 64 V ja 68 V syöttöjännitteillä. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.	46
Kuva 9. Lukitusraudalla suoritettun oikosulkutestin mittaustulokset 2-napaiselle moottorille.	50
Kuva 10. Ehjän 2-napaisen moottorin päävirta oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysointilla mitattuna aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.	51

- Kuva 11. Ehjän 2-napaisen moottorin pääjännite oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 52
- Kuva 12. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 53
- Kuva 13. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 54
- Kuva 14. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 55
- Kuva 15. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin oikosulkuvirran perustaajuuden spektri. 55
- Kuva 16. Lukitusraudalla suoritetun oikosulkutestin mittaustulokset 6-napaiselle moottorille. 57
- Kuva 17. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirta oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 58
- Kuva 18. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 59
- Kuva 19. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna

- aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin
kytketään kolmivaiheinen jännite. 60
- Kuva 20. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä
ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna
aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin
kytketään kolmivaiheinen jännite. 61
- Kuva 21. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet
oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla
mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin
staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 62
- Kuva 22. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin oikosulkuvirran
perustaajuuden spektri. 62
- Kuva 23. 6-napaisen moottorin roottori, johon on porattu reikä. 64
- Kuva 24. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirta
oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta
tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä
 $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 67
- Kuva 25. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite
lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla
mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin
staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 68
- Kuva 26. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat
oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla
mitattuna aikavälillä $t = 0-8,5$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin
staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 68
- Kuva 27. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat
oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla
mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin
staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 69

- Kuva 28. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna ajanhetkellä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 70
- Kuva 29. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirta oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 71
- Kuva 30. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 72
- Kuva 31. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8,5$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 72
- Kuva 32. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 73
- Kuva 33. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite. 74
- Kuva 34. Oikosulkuvirran verhokäyrät 6-napaisen moottorin oikosulkutestistä ilman lukitusrauta 58 V:n (a) ja 102 V:n (b) syöttöjännitteellä ajan funktiona. 78
- Kuva 35. 6-napaisen moottorin oikosulkuvirrat 58 V:n ja 102 V:n syöttöjännitteillä. 78
- Kuva 36. Testauskeskuksen AL2A periaatekaavio. 93

Kuva 37. Tektronix 4 Series MSO44 -oskilloskoopin tekniset tiedot (Tektronix, 2022, s. 28).	94
Kuva 38. Fluke i410 AC/DC -virtapihdin tekniset tiedot (Fluke, 2023a, s. 1–2).	95
Kuva 39. Teledyne LeCroy HDO6054 -oskilloskoopin tekniset tiedot (Teledyne LeCroy, 2012, s. 15).	96
Kuva 40. LeCroy WaveSurfer 44Xs -oskilloskoopin tekniset tiedot (LeCroy, 2006, s. 9).	97
Kuva 41. Fluke i1000s -virtapihdin tekniset tiedot (Fluke, 2023b, s. 1–2).	98
Kuva 42. Fluke 80i-1000s -virtapihdin tekniset tiedot (Fluke, n.d, s. 2).	99

Kuviot

Kuvio 1. Oikosulkumoottoreiden viat (mukaillen Karami ja muut, 2010, s. 1951).	30
--	----

Taulukot

Taulukko 1. 2-napaisen testimoottorin nimellisarvot.	40
Taulukko 2. Testattavien moottoreiden tyypit ja tuotekoodit.	47
Taulukko 3. Suunnittelun laskemat tarkastusarvot 2-napaiselle testimoottorille oikosulkutestiä varten.	49
Taulukko 4. 6-napaisen testimoottorin nimellisarvot.	56
Taulukko 5. Suunnittelun laskemat tarkastusarvot 6-napaiselle testimoottorille oikosulkutestiä varten.	56
Taulukko 6. Vanhalla testausmenetelmällä tehtyjen mittausten tulosten vertailu.	65
Taulukko 7. 2-napaisen ehjän moottorin oikosulkutestin tulokset.	76
Taulukko 8. 6-napaisen ehjän moottorin oikosulkutestin tulokset.	77
Taulukko 9. Mittaustulosten vertailu, kun mitataan ilman lukitusrautaa, yksittäinen mittauserä.	81

Taulukko 10. Mittaustulosten vertailu, kun mitataan ilman lukitusrautaa, $t = 0,5-2$ s.	82
Taulukko 11. Mittaustulosten vertailu, kun mitataan ilman lukitusrautaa, $t = 0,5-3,5$ s.	82

Termit

desibelimilliwatti	Logaritminen tehon yksikkö.
keskiarvoistusaika	Aikajakso, jota mittausohjelman laskenta käyttää mitattujen näytteiden keskiarvoistamisessa ja mittaustuloksen muodostamisessa.
kuorma	Moottorin tehoa ottava ja kuluttava laite.
mittausaika	Aikajakso, jonka aikana mittausnäytteitä kerätään.
mittausnäyte	Mitattavaa kokonaisuutta tai ilmiötä edustava yksittäinen otos.
muutosilmiö	Tarkasteltavassa muuttujassa esiintyvä muutos kahden peräkkäisen vakaan jatkuvuustilan välillä.

Lyhenteet

DOL	direct online, suora verkkosyöttö
DTC	direct torque control, suora vääntömomentin säätö
FFT	Fast Fourier transform, nopea Fourier-muunnos
IEC	International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähköalan standardointiorganisaatio
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, kansainvälinen sähkötekniikan alan järjestö
MCSA	motor current signature analysis, moottorin virtaan perustuva vika-analyyysimenetelmä
UPS	uninterruptible power supply, keskeytymätön virransyöttö

Kreikkalaiset symbolit

α	vaihekulma
ϕ	tehokulma, josta lasketaan tehokerroin $\cos\phi$
ϕ_{km}	tehokulma alennetulla jännitteellä, josta lasketaan oikosulkutehokerroin $\cos\phi_{km}$
ω	kulmanopeus
ω_0	kulmanopeus vikataajuudella

Muut symbolit

f	taajuus
f_0	ominaisvikataajuus
f_{km}	laskennallinen oikosulkutaajuus alennetulla jännitteellä
f_{kmm}	mitattu oikosulkutaajuus alennetulla jännitteellä
f_s	syöttötaajuus
I	sähkövirran voimakkuus
I_a	vaihevirta
\hat{I}_a	vaihevirran huippuarvo
I_{af}	vaihevirta, kun roottori on epäsymmetrinen
I_k	laskennallinen oikosulkuvirta
I_{km}	laskennallinen oikosulkuvirta alennetulla jännitteellä
I_{kmax}	maksimioikosulkuvirta alennetulla jännitteellä
I_{kme}	oikosulkuvirran odotusarvo alennetulla jännitteellä
I_{kmm}	mitattu oikosulkuvirta
$\Delta I_{km\%}$	mitatun oikosulkuvirran ja odotusarvon välinen poikkeama
I_n	nimellisvirta
I_{nmax}	maksimimellisvirta
j	imaginääriyksikkö

M	modulaatioindeksi
m	modulaatiosignaali
N	lukumäärä
N_b	rikinäisten roottorisauvojen määrä
N_t	roottorisauvojen kokonaismäärä
P	teho
P_{fe}	rautahäviöt
P_{fw}	ilmanvastus- ja kitkahäviöt
P_{km}	laskennallinen oikosulkuteho alennetulla jännitteellä
P_{kme}	oikosulkutehon odotusarvo alennetulla jännitteellä
P_{kmm}	mitattu oikosulkuteho
$\Delta P_{km\%}$	mitatun oikosulkutehon ja odotusarvon välinen poikkeama
s	jättämä
t	aika
U	jännite
U_n	nimellisjännite
U_{km}	laskennallinen oikosulkujännite
U_{kmm}	mitattu oikosulkujännite

1 Johdanto

Kaikki ABB oy:n IEC LV Motors -yksikön tehtailta valmistuvat moottorit testataan tuotantolinjalla standardin IEC 60034-1 (Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance) mukaisesti. Standardin mukaiseen oikosulkumoottorin rutiinitestiin kuuluvat vaihevastusten mittaaminen, tyhjäkäyntitesti, toistoaltokoestus, pyörimissuunnan tarkastus ja eristyskoestus (IEC 60034-1, 2017a, s. 53). IEC 60034-1-standardi ei vaadi oikosulkutestiä, mutta se suoritetaan ABB:llä kaikille oikosulkumoottoreille osana rutiinitestiä laadun ja toiminnan varmistamiseksi.

Oikosulkumoottorin käynnistyessä tai ollessa jumissa, moottorissa vaikuttaa oikosulkuvirta (Verkkonen, 2017, s. 51). Oikosulkuvirtaa rajoittavat ainoastaan pitkittäisimpedanssi eli oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi (Verkkonen, 2017, s. 51; 57). Nimellisvirralla tehtävästä oikosulkutestistä saadaan selville moottorin virtalämpöhäviöt sekä oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi (Verkkonen, 2017, s. 57). Jännitteen kytkeminen aiheuttaa moottorin piiriin transienttikomponentin ja sysäysvirran, joiden suuruudet riippuvat moottorin resistanssien ja reaktanssien suhteesta (Verkkonen, 2017, s. 57).

Diplomityössä tutkitaan uudenlaista testausmenetelmää, jossa moottorin akselia ei lukitakaan perinteiseen tapaan, vaan moottorin akselin annetaan pyöriä vapaasti ilman ulkoista kuormaa. Kuormitus tarkoittaa kaikkia mekaanisia ja sähköisiä suureita, jotka vaikuttavat moottoriin mekaanisesti tai sähköisen piirin välityksellä tietyllä hetkellä (IEC, 1996a). Testi suoritetaan moottorin käynnistysvaiheessa alijännitteellä. Moottorin hitausmassa toimii kuorman tavoin ja hidastaa moottorin käynnistymistä.

Tutkimusaihe on yritykselle ajankohtainen ja tarpeellinen. Testausprosessin uudistamisella voidaan parantaa testauksen työturvallisuutta. Akselin lukitusrauta voi aiheuttaa vaaratilanteita, jos jostain syystä esimerkiksi syöttöjännite on liian korkea tai moottorin pyörimissuunta on väärä. Liitännävaiheessa virheelliset vaihekytkennät voivat aiheuttaa sen, että moottori pyörii väärään suuntaan, jolloin lukitusrauta voi oikosulkutestissä pyörähtää akselin ympäri. Oikosulkumoottoreiden vääntömomentit ovat suuria, ja riskinä on

lukitusraudan vikaantuminen ja irtoavien osien aiheuttamat vahingot tai moottorin kaahtuminen.

Tutkimuksella on myös taloudellinen merkitys, koska testin helpottaminen ja nopeuttaminen lisääisi tuotantolinjojen tehokkuutta ja testauskapasiteettia. Tavoitteena on jatkossa yhdistää oikosulku- ja tyhjäkäyntitesti siten, että oikosulkutestin mittaukset suoritetaan moottorin käynnistysvaiheessa uuden menetelmän mukaisesti ja tyhjäkäyntitestin mittaukset suoritetaan, kun moottori on saavuttanut täyden pyörimisnopeuden nimellisellä syöttöjännitteellään. Tyhjäkäynti tarkoittaa, että moottori pyörii ilman kuormaa eikä tuota antotehoa (IEC, 1996b). Tässä tutkimuksessa keskitytään kuitenkin vain oikosulkutestin osuuteen, sillä uudistus ei vaikuta tyhjäkäyntitestin toimintaan tai luotettavuuteen.

Diplomityö koostuu teoreettisesta ja empiirisestä osuudesta. Pääluvussa 2 tarkastellaan yleisesti rutiinitestipaikan rakennetta ja keskeisiä mittauslaitteita. Luvussa 3 käsitellään perinteistä tuotannossa käytössä olevaa oikosulkutestimenetelmää, jossa oikosulkumoottorin roottorin pyöriminen estetään lukitusraudalla. Luvussa 3 tarkastellaan mittausmenetelmää, tulosten laskentaa sekä nykyisiä hyväksymisrajoja. Uuden mittausmenetelmän teoriaa ja toimintaperiaatetta käsitellään luvussa 4. Pääluvussa 5 tarkastellaan roottorivikoja sekä niiden tunnistusmenetelmiä kirjallisuuskatsauksen muodossa. Luvussa 6 analysoidaan mittausmenetelmän luotettavuutta ja tehoanalysointimenetelmän mittaus-tarkkuutta. Luvuissa 7 ja 8 käsitellään testimoottoreille suoritettuja oikosulkutestejä. Mittausdataa analysoidaan luvussa 9, ja työn johtopäätökset esitetään luvussa 10.

1.1 Työn tarkoitus

Tämän diplomityön tarkoituksena on antaa vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten oikosulkuvirta ja -jännite voidaan mitata ja laskea oikosulkumoottorilta, jonka akselia ei olekaan lukittu?

- Millaisia asioita täytyy huomioida oikosulkutestin mittaussajankohdan ja mittausajan valinnassa?
- Voidaanko nykyisillä mittalaitteilla ja uudennlaisella, ilman lukitusrautaa suoritettavalla oikosulkutestillä havaita roottorisauvavikoja?

Diplomityössä tutkitaan, miten ilman lukitusrautaa suoritettava oikosulkutesti toimii ja saadaanko uudennlaisella testausmenetelmällä samanlaisia mittaustuloksia kuin perinteisellä lukitusrautamenetelmällä. Uudennlaisen mittausmenetelmän luotettavuutta tutkitaan vertaamalla tuloksia vanhan mittausmenetelmän mukaisiin tuloksiin. Lisäksi työssä arvioidaan, onko testipaikalla käytössä oleva tehoanalyysoija riittävän tarkka näyttöennottotajuudeltaan, jotta mittaustulokset voisivat olla luotettavia. Tehoanalyysoijan mittaustuloksia verrataan oskilloskoopilla suoritettuihin mittauksiin. Oskilloskoopin näyttöennottotajuuus on suurempi kuin tehoanalyysoijan. Tehoanalyysoijan näyttöennottotajuuuden voidaan todeta olevan riittävän tarkka, mikäli mitään tärkeää informaatiota ei jää huomaamatta oskilloskoopin tuloksiin verrattuna.

Diplomityössä on siis myös tarkoitus kartoittaa, voidaanko uudennlaisella menetelmällä ja käytössä olevalla tehoanalyysoijalla tunnistaa roottorivikoja. Työssä tutkitaan, voidaanko roottorin katkennut sauva huomata mittaustuloksista, jos roottoria ei ole lukittu testin ajaksi. Erilaiset epäsymmetriat ja muut roottorin viat voisivat mahdollisesti käyda selkeämmin ilmi, jos viallinen sauva pyörii hitaasti eri vaiheisiin nähden ja aiheuttaa virrassa vaihtelua pyörimisnopeuden suhteen. (T. Pantti, henkilökohtainen keskustelu, 25.11.2022). Hitaan pyörimisnopeuden saavuttaminen pienillä moottoreilla saattaa kuitenkin olla haasteellista, koska niiden hitausmomentti ja roottorin massa ovat yleensä pieniä, ja ne saavuttavat täyden pyörimisnopeuden nopeasti. Roottoriviallista moottoria testataan sekä lukitusraudalla että ilman lukitusrautaa, jotta voidaan varmistua, ettei tärkeää mittaustuloksia tai informaatiota menetetä uudennlaiseen testausmenetelmään siirryttäessä. Ennakkoon ei ollut tiedossani, näkyvätkö roottorisauvan viat vanhalla lukitusrautamenetelmällä.

Rutiinitestipaikoilla on käytössä tehoanalysaattori, joka mittaa päävirtoja ja -jännitteitä oikosulkutestissä. Tehoanalysaattori ilmoittaa tulokset virran ja jännitteen tehollisarvoina. MotTest-mittausohjelmisto laskee vaiheista mitattujen päävirtojen ja -jännitteiden keskiarvot, ja vertaa päävirtojen välistä eroavaisuutta sekä päävirran ja oikosulkutehon keskiarvoa suunnittelun laskeman tarkastusarvon perusteella muodostettuun odotusarvoon. Diplomityössä tutkitaan, onko mittauksessa riskinä, että vikaantuneen moottorin päävirtojen välinen ero ei ole riittävän suuri tai että vika ei ilmene keskiarvoistetussa virrassa riittävästi, jolloin roottorivika voisi jäädä huomaamatta.

1.2 Työn rajaus

Vaasan IEC LV Motors -yksikön tehtaissa valmistetaan oikosulkumoottoreita runkokoissa 71–500. Runkokoko ilmaisee moottorin akselin korkeuden millimetreinä asennuspinnasta mitattuna. Suurempien oikosulkumoottoreiden rutiinitestaus vie enemmän aikaa kuin pienten moottoreiden, koska niiden käynnistyminen, kiihtyminen täyteen pyörimisnopeuteen ja pysähtyminen kestävät kauemmin. Suurissa moottoreissa roottorin massa ja hitausmomentti ovat suurempia, minkä takia roottori saattaa pyöriä ilman kuormaa melko pitkään vielä jännitesyötön katkaisemisen jälkeenkin.

Työssä keskitytään tuotantolinjan rutiinitestipaikkaan AL2A. Tuotantolinjojen AL1A, AL1B, AL2A, AL2B ja AL3B rutiinitestipaikoilla on samanlainen toimintaperiaate. Näillä rutiinitestipaikoilla akselin lukitusrauta asennetaan käsin, joten prosessin uudistaminen parantaisi työturvallisuutta ja nopeuttaisi työtä. AL3A- ja AL3C-tuotantolinjojen testipaikoja ei käsitellä tässä tutkimuksessa, koska niillä ei ole yhtä suurta tarvetta uudistukselle. Kyseisillä tuotantolinjoilla testattavat moottorit ovat runkokooltaan pieniä, ja oikosulkutestissä käytettävä lukitusrauta on integroitu testaussysteemiin. Näiden syiden takia AL3A- ja AL3C-tuotantolinjojen testausprosessi on jo nopeampi ja turvallisempi muihin testipaikkoihin verrattuna.

Tässä työssä suoritetaan mittauksia kahdelle oikosulkumoottorille, joiden runkokoko on 315. Työhön valitut moottorit ovat 2- ja 6-napaisia. Diplomityössä keskitytään linjalla tehtäviin rutiinistestihin, joten moottorit testataan 50 Hz:n taajuudella muuntajalta tulevalla suoralla syötöllä (eng. *direct online*, DOL). Tuotantolinjojen rutiinistestipaikoilla ei ole käytössä 60 Hz:n syöttötaajuutta. Työssä ei tutkita, miten esimerkiksi 60 Hz:n taajuus tai generaattorilta tuleva syöttö vaikuttavat mittaustuloksiin. Tässä työssä tarkastellaan mittaukseen vaikuttavia tekijöitä sähkötekniikan näkökulmasta, joten esimerkiksi signaalin muodostumiseen tai signaalinkäsittelyyn ei syvennyttä.

2 Testipaikan rakenne

Vaasan IEC LV Motors -yksikön tuotantolinjojen AL1A, AL1B, AL2A, AL2B ja AL3B rutiinitestipaikoilla on keskenään samanlainen toimintaperiaate ja rakenne. Testausasemien päälaitteet ovat testauskeskus, tyhjäkäyntikokeen muuntaja TO, oikosulkukokeen muuntaja TK, ohjelmoitava logiikkayksikkö PLC, valvomotietokone ja -ohjelmat, turvapiirien laitteet, hätä-seis-katkaisimet ja varoitusvalot (Ketoluoto, 2009, s. 4). Testiä ohjataan automaatio-ohjelmalla, ja mittauksia suoritetaan MotTest-mittausohjelmistolla. Rutiinitestipaikoilla voidaan testata yksi- ja kaksinopeusmoottoreita. Testipaikoilla yksinopeusmoottoreiden maksimioikosulkuvirta I_{kmax} on 450 A ja maksiminimellisvirta I_{nmax} 1000 A (Ketoluoto, 2009, s. 10). Kaksinopeusmoottoreiden maksimioikosulkuvirta I_{kmax} on 150 A ja maksiminimellisvirta I_{nmax} 300 A (Ketoluoto, 2009, s. 11).

Liitteessä 1 on esitetty testauskeskuksen AL2A (ent. MM50) periaatekaavio. Testauskeskus sisältää kaikki laitteiston suojaukseen ja moottorin ohjaukseen liittyvät pääpiirien komponentit (Ketoluoto, 2009, s. 4). Näitä komponentteja ovat muun muassa sulakkeet, kontaktorit, katkaisijat, virtamuuntajat, maadoituskytkimet, johdonsuoja-automaatit, ohjausreleet, UPS (eng. *uninterruptible power supply*) eli keskeytymätön virransyöttö, logiikka, virtalähteet ja mittamuuntimet (Ketoluoto, 2009, s. 4).

2.1 Testipaikan muuntajat

Testauskeskuksen yläpuolelle erillisten teräskehikoiden päälle on sijoitettu tyhjäkäyntitestin muuntaja TO ja oikosulkutestin muuntaja TK (ks. liite 1). Muuntajien kaikki kytkennät tapahtuvat testauskeskuksen kontaktoreilla (Ketoluoto, 2009, s. 4–5). Tyhjäkäyntitestissä 400 V:n syöttöjännite muunnetaan muuntajalla TO vastaamaan testattavan moottorin nimellisjännitettä U_n (Ketoluoto, 2009, s. 4). Tyhjäkäyntitestin muuntajalta voidaan valita 230 V:n, 400 V:n, 500 V:n tai 690 V:n kolmivaiheinen jännite, jota voidaan säätää muuntajan väliottojen avulla 1,6 prosentin välein (Ketoluoto, 2009, s. 4). Säädön avulla jokaiselle nimellisjännitteelle saadaan seitsemän jänniteporrasta (Ketoluoto, 2009, s. 4).

Oikosulkutestin jännite valitaan yleensä siten, että virta vastaa testattavan moottorin nimellisvirtaa. Oikosulkutestin jännite ja kytkentä pyritään valitsemaan niin, että moottorin sähkömagneettinen tila olisi lähellä jotain aiemmin testatun moottorin laskelmaa, jolloin arvojen laskemiseen löytyy luotettava vertailukohta (Hakoniemi, 2018, s. 1). Lisäksi jännitteen valintaan vaikuttaa se, mitä jännitteitä rutiinitestipaikan muuntajalta on mahdollista saada. Oikosulkutestin muuntajan TK toisiokäämit voidaan kytkeä tähti- tai kolmiokytkentään (Ketoluoto, 2009, s. 5). Oikosulkutestin muuntajalta voidaan valita 55 V, 66 V, 88 V, 95 V, 114 V tai 141 V kolmivaiheinen jännite, jota voidaan säätää 3,2 prosentin välein muuntajan väliottojen avulla (Ketoluoto, 2009, s. 5). Näillä kytkennöillä jännitettä voidaan säätää 42 jänniteportaan mukaisesti (Ketoluoto, 2009, s. 5).

2.2 Testipaikan ohjaus- ja valvomolaitteet

Rutiinitestipaikan valvomon tietokone on yhdistetty Ethernet-kaapelilla testauskeskukseen ohjelmitavaan ABB AC500-PLC-logiikkayksikköön, jolla ohjataan testausprosessin eri toimintoja (Ketoluoto, 2009, s. 5). Valvomo-ohjelmistossa on kaksi päänäkymää ja ohjaustilaa, jotka määräytyvät moottorille tehtävän testin mukaan. Tyhjäkäynti- ja oikosulkutestissä on eri ohjausnäkyvät ja -vaihtoehdot.

Valvomotietokoneella ohjataan testausaseman kontaktoreita. Valvomo-ohjelmiston avulla voidaan valita virtamuuntajan virta-alue ja jännitemuuntajien TO ja TK jännitetaso, hienosäätää jännitettä ja käynnistää ja pysäyttää testattava moottori (Ketoluoto, 2009, s. 14–16). Oikosulkutestissä valvomo-ohjelmistolla valitaan oikosulkutestin muuntajan TK toisiopuolen kytkennäksi tähti tai kolmio (Ketoluoto, 2009, s. 15).

2.3 Testipaikan tehoanalyysointilaite ja MotTest

Tehoanalyysointilaite ja tietokoneella ohjattava mittausohjelma MotTest on yhdistetty toisiinsa Ethernet-kaapelilla. Rutiinitestipaikoilla käytetään Fluke Norma 4000-mallin tehoanalyysointilaitteita. Tehoanalyysointilaite mittaa syöttöjännitettä ja -virtaa ja laskee muun muassa näennäis-, pätö- ja loistehoa (Fluke, 2007, s. 8-3). Tehoanalyysointilaitteen mittausalueen ylärajaksi on ilmoitettu 1000 V ja 20 A, ja sillä voidaan mitata samanaikaisesti jopa kuutta kanavaa (Fluke, 2007, s. 3-7).

Tehoanalyysointilaite mittaa virtaa testauskeskuksen kiskoston virtamuuntajalta. Tehoanalyysointilaitteen käyttämä virtamuuntajan alue valitaan manuaalisesti. Pienillä virroilla mittaus-tarkkuutta voidaan parantaa ohjaamalla virta suoraan tehoanalyysointilaitteen läpi (Ketoluoto, 2009, s. 16). Suoraa mittausastetta voidaan käyttää vain, jos virta on alle 10 A ja jännite alle 600 V (Ketoluoto, 2009, s. 16).

MotTest-mittausohjelmalla suoritetaan oikosulku- ja tyhjäkäyntitestin mittaukset. Lukitusrautamenetelmällä tehtävässä oikosulku-testissä tehoanalyysointilaite ottaa mittausnäytteen viiden sekunnin ajan. Tehoanalyysointilaitteen mitattu data siirretään tietokoneelle MotTest-mittausohjelmaan, joka keskiarvoistaa mittausnäytteet mittausajan suhteen LabView:n funktiota käyttäen. Tämän diplomityön mittauksissa käytetään MotTest-mittausohjelmiston uutta versiota, jota ei ole vielä vapautettu tuotannon käyttöön. MotTestistä ladataan mittausdata Excel-tiedostoon, jota käytetään kuvaajien piirtämiseen ja datan analysointiin. MotTest ei tässä vaiheessa keskiarvoista mittausnäytteitä eikä vielä muodosta automaattisesti mittausraporttia.

3 Perinteinen oikosulkutesti lukitusraudalla ja alennetulla jännitteellä

Kaikki IEC LV Motors -yksiköstä valmistuvat sähkömoottorit testataan tuotantolinjalla standardin IEC 60034-1 (Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance) mukaan. Oikosulkumoottorin rutiinitestiin kuuluu silmämääräinen tarkastus, vaihevastuksen mittaaminen, toistoaltokoestus, lisälaitteiden tarkistus, eristyskoestus, eristysvastusmittaus, tyhjäkäyntitesti, värinämittaus, oikosulkutesti ja mekaaniset mittaukset (Similä, 2022, s. 1–9). Standardi ei vaadi oikosulkutestin suorittamista rutiinitestissä, mutta se tehdään ABB:llä laadun varmistamiseksi. Tarvittaessa rutiinitestissä voidaan tehdä myös roottorin pyöryntitesti, jos epäillään virhettä roottorin alumiinikäilyssä (Similä, 2022, s. 9). Tyhjäkäyntitestissä, värinämittauksessa ja oikosulkutestissä käytetään 50 Hz:n taajuutta.

Oikosulkutesti suoritetaan täydellä nimellisjännitteellä tyyppitestin yhteydessä, mutta rutiinitestipaikoilla ei ole siihen soveltuvaa testilaitteistoa, sillä nimellisjännitteellä moottorin vääntömomentti on huomattavasti suurempi kuin alennetulla jännitteellä. Nimellisjännitteellä suoritettavasta oikosulkutestistä käytetään myös nimitystä käynnistystesti, ja kyseisessä testissä mitataan moottorin lähtövirta ja -momentti. Lähtövirta tarkoittaa suurinta virran tehollisarvoa, jonka moottori ottaa, kun akselin pyöriminen on estetty ja kun syöttöjännite ja -taajuus on valittu nimellisarvojen mukaisesti (IEC, 1996c). Tässä työssä oikosulkutestissä mitattavasta virrasta käytetään termiä oikosulkuvirta, sillä se on vakiintunut termi yrityksessä. Rutiinitestipaikoilla ei mitata testattavan moottorin momenttia.

McElveen ja Melfi (2016, s. 3596) selittävät, että nimellisjännitteellä suoritettavan oikosulkutestin mittaukset on suoritettava mahdollisimman nopeasti, jotta moottori ei ehdi lämmetä liikaa. He toteavat, että standardissa IEEE 112 (IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators) on ohjeistettu, että mittaus täytyisi suorittaa viiden sekunnin kuluessa jännitesyötön kytkennästä. Alennetulla jännitteellä ja

pienemmällä virralla testattava moottori ei ehdi lämmetä yhtä nopeasti, minkä takia testausaika ei ole yhtä kriittinen.

Oikosulkutestistä saadaan selville moottorin virtalämpöhäviöt sekä oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi, joita kutsutaan myös pitkittäisresistanssiksi ja -reaktanssiksi (Verkkonen, 2017, s. 51). Verkkosen (2017, s. 57) mukaan resistanssin ja reaktanssin oletetaan yleensä jakautuvan tasan staattoriin ja roottoriin. Standardin mukaiseen rutiinitestiin kuuluu vaihevastusten eli staattorivastuksen mittausta. Kun staattorivastus on tiedossa, roottorivastus on mahdollista laskea oikosulkutestin mittaustulosten perusteella (Verkkonen, 2017, s. 57). Staattorivastusmittaukset ja oikosulkutesti täytyy kuitenkin tehdä samassa ympäristölämpötilassa, jotta tulos on luotettava.

Oikosulkutestiä varten roottorin pyöräminen estetään akselin lukituslaitteella (kuva 1). Kun roottorin pyöräminen on estetty, moottori vastaa toiminnaltaan muuntajaa, jonka toisio on oikosulussa (Verkkonen, 2017, s. 34). Ennen akselin lukitsemista tarkistetaan roottorin pyörämissuunta, jotta lukitusrauta voidaan asentaa oikeaan asentoon.



Kuva 1. Oikosulkumoottori akseli lukittuna.

Oikosulkutesti suoritetaan alennetulla jännitteellä, joka on laskettu yleensä siten, että kuormitusvirta on moottorin nimellisvirran suuruinen. Alennetulla jännitteellä suoritettussa oikosulkutestissä moottorin rautahäviöt P_{fe} ovat pienet, sillä ne ovat verrannolliset jännitteen neliöön (Verkkonen, 2017, s. 57). Lukitusraudalla tehtävässä oikosulkutestissä moottorilla ei myöskään ole mekaanisia häviöitä (Verkkonen, 2017, s. 57). Mekaanisia häviöitä ovat standardissa IEC 60034-2-1 (Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)) esitetyt ilmanvastus- ja kitkahäviöt P_{fw} .

Mittaus suoritetaan MotTest-mittausohjelmalla. Oikosulkutestissä mitataan tehoanalyysaattorilla oikosulkuvirta I_{kmm} , -jännite U_{kmm} ja -teho P_{kmm} , ja mittausohjelma vertaa mitattuja arvoja oikosulkuvirran ja -tehon odotusarvoihin I_{kme} ja P_{kme} (Similä, 2022, s. 8). Odotusarvot lasketaan suunnittelun määrittämien tarkastusarvojen perusteella siten, että ne vastaavat mittauksessa käytettyä jännitettä (Similä, 2022, s. 8). Odotusarvot ovat vertailuarvoja, joita korjataan mitattujen arvojen perusteella (Hauru & Pantti, 2010, s. 3). Suunnittelu laskee alennetulla jännitteellä eli testausjännitteellä oikosulkuteho-

kertoimen $\cos\phi_{km}$ ja -virran I_{km} , joiden avulla pystytään määrittämään oikosulkuteho P_{km} alennetulla jännitteellä yhtälöllä

$$P_{km} = \sqrt{3}U_{km}I_{km} \cos \phi_k, \quad (1)$$

missä U_{km} on laskennallinen oikosulkujännite (Hakoniemi, 2018, s. 5). Todellisuudessa oikosulkutehokerroin ei juurikaan muutu alennetulla tai nimellisellä jännitteellä, joten $\cos\phi_{km} \approx \cos\phi_k$ (Hakoniemi, 2018, s. 5). Nimellisjännitteen mukainen oikosulkuvirta I_k voidaan laskea kertomalla alennetun jännitteen oikosulkuvirta I_{km} täyden jännitteen U ja alennetun jännitteen U_{km} suhteella

$$I_k = \frac{U}{U_{km}} I_{km} \quad (2)$$

(Hakoniemi, 2018, s. 8). Laskelman tyhjäkäynti- ja oikosulkupisteen arvot kerrotaan korjauskertoimilla, jotka on määritetty suunnittelun laskemien aiempien laskelmien perusteella (Hakoniemi, 2018, s. 8). Korjauskerroin on todellisen testatun arvon ja lasketun arvon suhde, joka ilmaisee niiden välistä vääristymää (Hakoniemi, 2018, s. 8).

Hauru ja Pantti (2010, s. 3) osoittavat, että MotTest-mittausohjelmisto laskee korjatun odotus- eli referenssiarvon I_{kme} mitattujen arvojen perusteella yhtälöllä

$$I_{kme} = I_{km} \cdot \frac{U_{kmm}}{U_{km}} \cdot \frac{f_{km}}{f_{kmm}}, \quad (3)$$

missä I_{km} on laskennallinen oikosulkuvirta, U_{km} laskennallinen oikosulkujännite, f_{km} laskennallinen oikosulkutaajuus, U_{kmm} mitattu oikosulkujännite ja f_{kmm} mitattu oikosulkutaajuus. MotTest laskee mitatun oikosulkuvirran I_{kmm} poikkeaman suhteessa korjattuun odotusarvoon yhtälöllä

$$\Delta I_{\text{km}\%} = 100 \% \cdot \frac{I_{\text{kmm}} - I_{\text{kme}}}{I_{\text{kme}}} \quad (4)$$

(Hauru & Pantti, 2010, s. 3). MotTest laskee oikosulkutehon odotusarvon P_{kme} kertomalla laskennallisen oikosulkutehon P_{km} mitatun oikosulkujännitteen ja laskennallisen oikosulkujännitteen suhteen neliöllä (Hauru & Pantti, 2010, s. 3)

$$P_{\text{kme}} = P_{\text{km}} \cdot \left(\frac{U_{\text{kmm}}}{U_{\text{km}}} \right)^2 \quad (5)$$

MotTest vertaa mitattua tehonarvoa P_{kmm} tehon odotusarvoon

$$\Delta P_{\text{km}\%} = 100 \% \cdot \frac{P_{\text{kmm}} - P_{\text{kme}}}{P_{\text{kme}}}, \quad (6)$$

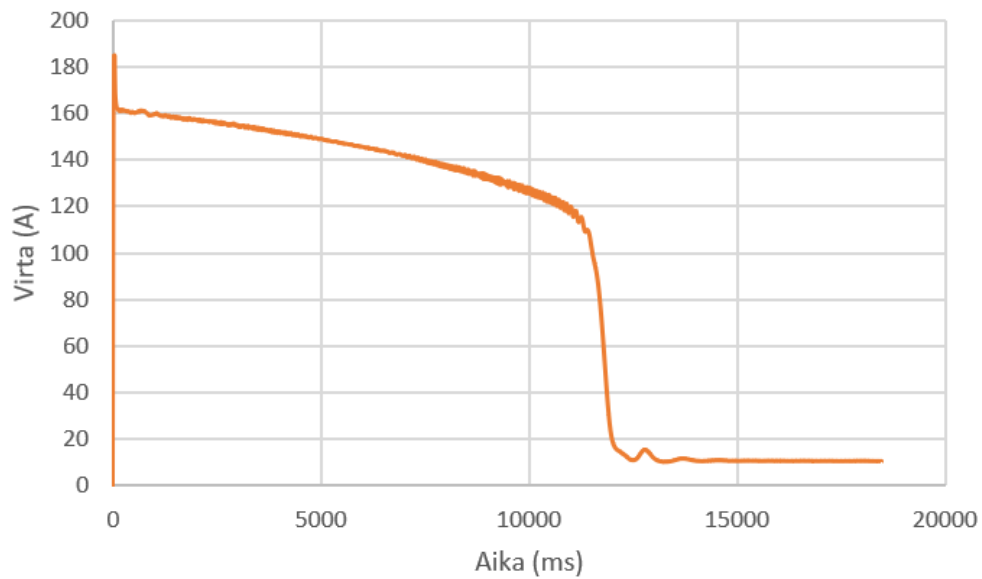
jotta saadaan selville mitatun ja odotusarvon välinen poikkeama (Hauru & Pantti, 2010, s. 3). Virran vaiheiden välistä eroa eli epäsymmetriaa arvioidaan laskemalla päävirtojen poikkeamat keskiarvosta ja vertaamalla suurimman poikkeaman itseisarvoa keskiarvoon (A. Nieminen, henkilökohtainen keskustelu, 18.4.2023). Poikkeaman itseisarvo jaetaan päävirtojen keskiarvolla, ja kyseinen luku kerrotaan luvulla 100 %, jolloin saadaan poikkeama prosentteina. Jännitteen epäsymmetria lasketaan samalla tavalla.

Oikosulkuteho saa erota enintään 30 prosenttia odotusarvosta P_{kme} , ja oikosulkuvirta I_{kmm} saa erota odotusarvosta I_{kme} enintään 15 prosenttia (Similä, 2022, s. 8). Virran I_{kmm} vaiheiden välisen eron täytyy olla alle 5 prosenttia (Similä, 2022, s. 8). Oikosulkujännite U_{kmm} saa erota laskennallisesta oikosulkujännitteestä U_{km} enintään 3 prosenttia (Hauru & Pantti, 2010, s. 3).

4 Uuden mittausmenetelmän teoria

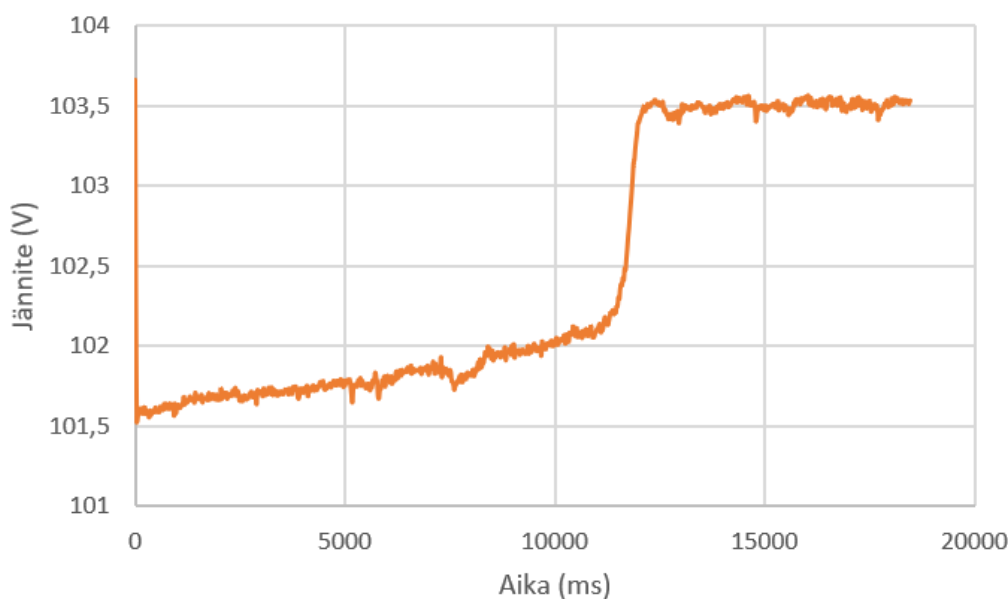
Uudella mittausmenetelmällä oikosulkumoottorin akselia ei lukita ja roottori saa siis pyöriä vapaasti. Kun oikosulkumoottori käynnistetään, staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite ja staattorikäämiin syntyy induktiivinen magnetoimisvirta (Verkkonen, 2017, s. 34). Kolmen vaiheen synnyttämät magnetomotoriset voimat aiheuttavat pyörivän magneettivuon (Verkkonen, 2017, s. 34). Verkkonen (2017, s. 34) selittää, että roottoriin induoituu jännite ja roottorikäämiin syntyy virta, joka pyörivässä magneettikentässä aiheuttaa voiman ja momentin. Hän toteaa, että momentin ylittäessä kuorman momentin, moottori lähtee pyörimään. Uuden menetelmän mukaisessa oikosulkutestissä moottori pyörii vapaasti ilman kuormaa. Syöttöjännitteen suuruutta säätämällä voidaan vaikuttaa virtojen suuruuteen ja siten myös moottorin momenttiin.

Oikosulkumoottorin virta koostuu kahdesta komponentista, jotka ovat pätö- ja loisvirta (ABB oy, 2001, s. 11). Pätövirta tuottaa momentin, ja magnetointivirta sisältyy loisvirta-komponenttiin (ABB oy, 2001, s. 11). Kuvassa 2 on esitetty oikosulkumoottorin päävirta käynnistyksen aikana ilman lukitusrauta. Kuvaajasta nähdään, että kytkentähetkellä virtaan aiheutuu kytkentäsysäysvirta, jonka jälkeen virta alkaa laskea. Tätä kutsutaan muutosilmiöksi, joka tarkoittaa tarkasteltavassa muuttujassa esiintyvää muutosta kahden peräkkäisen vakaan jatkuvuustilan välillä (IEC, 2013). Tässä esimerkkitapauksessa virran muutosilmiö kestää noin 11,5 sekuntia, jonka jälkeen virta putoaa ja saavuttaa vakaan tilan.



Kuva 2. Muutostilan virran kuvaaja, kun moottori on 6-napainen.

Kuvassa 3 on esitetty oikosulkumoottorin jännite käynnistyksessä. Jännite nousee ajankohdalla $t = 11,5$ s noin 1,5 V. Jännite nousee, kun moottorin pyörimisnopeus kiihtyy, ja kun roottorin inertia ei vastusta pyörivää liikettä enää samalla tavalla kuin käynnistyksen alkuvaiheessa.



Kuva 3. Muutostilan jännitteen kuvaaja, kun moottori on 6-napainen.

Verkkonen (2017, s. 51) selittää, että moottorin kuormitustila ei vaikuta käynnistyshetkellä mitatun virran suuruuteen, vaan se on riippuvainen vain oikosulkuvirran suuruudesta. Moottorin kuormitustila vaikuttaa kuitenkin käynnistysaikaan (Verkkonen, 2017, s. 51). Testi suoritetaan alijännitteellä, jolloin moottorin hitausmassa toimii kuorman tavoin ja pidentää moottorin muutosilmion ajallista kestoa (Asad ja muut, 2020, s. 1481). Tällöin moottorin pyörimisnopeus ja käynnistyminen ovat hieman hitaampia. Oikosulkuvirta ja -jännite pyritään määrittämään ja mittaamaan käynnistysvaiheessa muutosilmion arvoista ennen kuin moottori saavuttaa vakaan jatkuvan tilan ja lopullisen pyörimisnopeuden.

Lukitulla akselilla suoritettussa oikosulkutestissä ei siis ole mekaanisia häviöitä (Verkkonen, 2017, s. 57). Mekaaniset häviöt eli ilmanvastus- ja kitkahäviöt P_{fw} ovat jatkuvia häviöitä, joita aiheuttavat esimerkiksi laakereiden kitka sekä moottorin tuulettimeen ja muihin osiin vaikuttava ilmanvastus (IEC 60034-2-1, 2014, s. 9). Moottorin rautahäviöt P_{fe} ovat verrannollisia jännitteen neliöön (IEC 60034-2-1, 2014, s. 81). Ilmanvastus-, kitka- ja rautahäviöiden suuruuteen vaikuttavat jännitteen ja kuorman suuruus (IEC 60034-2-1, 2014, s. 9). Ilman lukitusrautaa suoritettava oikosulkutesti tehdään alennetulla

jännitteellä, ja moottorin pyörimisnopeus mittaushetkellä eli käynnistysvaiheessa on alhainen. Näistä syistä johtuen kyseisten häviöiden voidaan olettaa olevan pieniä, vaikka akselia ei olisikaan lukittu.

Verkkonen (2017, s. 51) toteaa, että jännitteen kytkeminen aiheuttaa moottorin piiriin transienttikomponentin ja sysäysvirran, jonka suuruus riippuu oikosulkureaktanssin suhteesta oikosulkuresistanssiin. Hän esittää, että suurilla moottoreilla voi olla suuri sysäysvirta, jos niiden oikosulkuresistanssi on pieni oikosulkureaktanssiin verrattuna. Tässä diplomityössä tarkastellaan, näkyykö ilman lukitusrautaa tehtävän oikosulkutestin mittaus tuloksissa sysäysvirtaa ja voiko se vaikuttaa mittaustuloksiin, kun mittaus suoritetaan moottorin käynnistysvaiheessa.

Tavoitteena on pystyä suorittamaan mittaus samalla alennetulla testausjännitteellä, jonka suunnittelu on laskenut lukitusraudalla tehtävää oikosulkutestiä varten. Tämä helpottaisi esimerkiksi laskentaa ja tarkastusarvojen muodostamista. Suuremman kokoluokan eli 250–315 runkokokojen moottoreilla oikosulkutestien mittauksista on saatu lupaavia tuloksia suunnittelun laskemalla alennetulla testausjännitteellä. Sen sijaan pienet moottorit saattavat kiihtyä täyteen pyörimisnopeuteen liian nopeasti, jolloin tehoanalysointorin näytteenottotaajuus saattaa olla liian pieni tai mahdollinen mittausvälin pituus on lyhyt.

5 Roottorin vikojen tunnistaminen rutiinitestissä

Häkkikämmitty oikosulkumoottori on yleisin moottorityyppi, ja sen suosio teollisuuskäytössä perustuu luotettavuuteen, kestävyYTEEN, energiatehokkuuteen ja edullisuuteen (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Mekaaniset rasitukset ja vaativat teollisuuskäytöt voivat kuitenkin myös altistaa oikosulkumoottorit vioille (Asad ja muut, 2020, s. 1481). Oikosulkumoottoreiden viat voidaan jakaa sähköisiin ja mekaanisiin vikoihin. Karami ja muut (2010, s. 1951) jaottelevat oikosulkumoottoreiden viat kuvion 1 mukaisesti.



Kuvio 1. Oikosulkumoottoreiden viat (mukaillen Karami ja muut, 2010, s. 1951).

Hassanin ja muiden (2018, s. 895) mukaan staattorivikojen osuus oikosulkumoottoreiden vioista on noin 30–40 prosenttia, roottorivikojen osuus noin 5–10 prosenttia ja mekaanisten vikojen, kuten epäkeskisyyden ja laakerivikojen, osuus on noin 40–50 prosenttia. Vikoja voivat aiheuttaa esimerkiksi syötön epätasapainoisuus tai staattorin käämityksen virheellinen kytkentä (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Roottorin vikoja aiheuttavat erilaiset rasitteet liittyen sähkömagneettisiin, dynaamisiin, mekaanisiin, ympäristö- ja

lämpöilmiöihin sekä näiden yhdistelmiin (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Tässä diplomityössä keskitytään roottorin vika-analyysimenetelmiin, sillä lukitusraudalla tehtävää oikosulkutestiä on käytetty pääasiassa roottorin oikeanlaisen toiminnan ja laadun varmistamiseen.

Roottorisauvojen vikojen tunnistaminen perinteisin mittausmenetelmin voi olla melko haastavaa (Garcia-Perez ja muut, 2014, s. 3403). Mittausmenetelmän täytyy olla riittävän yksinkertainen ja nopea, jotta se voidaan sisällyttää oikosulkumoottoreiden rutiini- ja tyyppitestausohjelmiin. Bellini ja muut (2008, s. 4113) toteavat, että staattorin vika-analyysimenetelmien kehittäminen voi johtaa älykkäämpiin suojausjärjestelmiin, mutta roottorin vika-analyysimenetelmät voisivat tarjota myös pohjan kokonaisvaltaisemmalle vianmäärittämismenetelmälle, joka olisi sovellettavissa koko moottorin toimivuuteen

Garcia-Perez ja muut (2014, s. 3403) sekä Thomson ja Fenger (2001, s. 26) selittävät, että vikaantuneet roottorisauvat harvoin suoraan aiheuttavat oikosulkumoottorin vikaantumisen, mutta niillä voi olla merkittäviä sekundäärisiä vaikutuksia. Roottorivikojen prosentuaalinen osuus kaikista oikosulkumoottoreiden vioista on siis melko pieni, mutta ne voivat edesauttaa muiden vikojen syntymistä. Oikosulkumoottori voi toimia ja olla käyttökuntoinen roottoriviasta huolimatta, mutta sen suorituskyky ja teho ovat heikentyneet (Lee ja muut, 2021, s. 7874).

Roottorin viat yleensä kehittyvät pahemmiksi ajan myötä, joten olisi tärkeää huomata viat ajoissa ennen kuin ne aiheuttavat vakavampia ongelmia (Asad ja muut, 2020, s. 1481). Rikkinäiset roottorisauvojen osat voivat vahingoittaa moottorin eristystä ja käämitystä (Thomson ja Fenger, 2001, s. 26). Vikaantuneet roottorisauvat voivat aiheuttaa myös kipinöintiä, joka on erityisen vaarallista räjähdysvaarallisissa tiloissa (Garcia-Perez ja muut, 2014, s. 3403; Thomson ja Fenger, 2001, s. 26). Moottorin vikaantuminen voi johtaa tuotannon keskeytymiseen, pysähtymiseen ja taloudellisiin menetyksiin. Korjauskustannukset voivat myös kohota korkeiksi, minkä takia olisi tärkeää tunnistaa roottoriviat ajoissa.

Hassan ja muut (2018, s. 895) ovat koonneet yleisiä syitä ja tilanteita, jotka voivat vahingoittaa roottorisauvoja. He selittävät, että suoralla syötöllä (DOL) tehtävät käynnistys- tai ylikuormatestit voivat aiheuttaa roottorin ylikuumenemista ja siten lämpöjännitystä. Sähkömagneettiset voimat, värinät ja kohina sekä epätasapainoiset magneettiset veto-voimat voivat aiheuttaa magneettisia rasitteita roottorille (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Dynaamisia rasitteita voivat aiheuttaa jännitteen vaihtelu, akselin vääntömomentin oskillointi, keskipakovoimat ja mekaanisen kuorman sykkiminen (Hassan ja muut, 2018, s. 895). He kertovat, että roottorisauvoihin vaikuttavia mekaanisia rasitteita aiheuttavat esimerkiksi laakeriviat, kuluneet osat ja roottorin heikko pinnoitus. Valuvirheet sekä altistuminen kosteudelle tai kemikaaleille voivat myös aiheuttaa rasitteita roottorin toiminnalle (Hassan ja muut, 2018, s. 895).

Garcia-Perez ja muut (2014, s. 3403) selittävät, että ehjien roottorisauvojen läpi kulkee korkeampi virta tilanteessa, jossa roottorissa on yksi tai useampi rikkinäinen roottorisauva. Vikaantuneen roottorisauvan vieressä olevassa ehjässä sauvassa virta voi kohota jopa 50 prosenttia nimellisvirrasta (Bellini ja muut, 2008, s. 4113). Staattorin virtaan rikkinäiset roottorisauvat aiheuttavat kuitenkin yleensä vain muutaman prosentin vaihtelua alkuperäiseen staattorivirtaan verrattuna (Bellini ja muut, 2008, s. 4113). Tämä omalta osaltaan voi vaikeuttaa vikojen tunnistamista. Yhtäjaksoisesti roottoriin vaikuttava kohonnut lämpötila ja korkeammat virrat voivat vahingoittaa roottoria (Garcia-Perez ja muut, 2014, s. 3403). Rikkinäiset roottorisauvat voivat aiheuttaa myös heilahtelua roottorin pyörimisnopeuteen ja vääntömomenttiin, mikä voi lisätä laakereiden ja muiden osien ennen aikaista kulumista (Garcia-Perez ja muut, 2014, s. 3403). Laakeriviat puolestaan voivat aiheuttaa akselin värinää ja ilmavälin epäkeskisyyttä (Tavner ja muut, 2008, s. 56).

5.1 Roottorin vika-analyysimenetelmät

Oikosulkumoottorit ovat pyörivän magneettikenttensä takia hyvin symmetrisiä sähköisiä järjestelmiä, ja erityyppiset viat vaikuttavat niiden symmetrisiin ominaisuuksiin (Bellini ja muut, 2008, s. 4109). Viallisia roottorisauvoja voi kuitenkin olla haastavaa tunnistaa perinteisillä mittaustekniikoilla (Garcia-Perez ja muut, 2014, s. 3403).

Roottorin analyysimenetelmät voidaan jakaa tekniikoihin, jotka vaativat moottorin rakenteen purkamista tai muokkaamista ja tekniikoihin, joita varten moottorin rakennetta ei tarvitse muuttaa (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Ensimmäiseen kategoriaan lukeutuvat esimerkiksi tärinä- ja magneettivuonmittaukset, joissa sensori asennetaan moottorin sisäpuolelle (Hassan ja muut, 2018 s. 895). Toiseen kategoriaan kuuluvat mittausmenetelmät perustuvat esimerkiksi moottorin virran, hetkellisen tehon, vääntömomentin, pyörimisnopeuden ja äänisignaalin analysointiin (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Osassa näistä menetelmistä sensori kiinnitetään suoraan moottorin runkoon (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Jälkimmäiseen kategoriaan kuuluvat menetelmät soveltuvat rutiini- ja tyyppitesteihin paremmin, sillä valmiin moottorin purkaminen ei ole prosessin kannalta tai ajankäytöllisesti toivottavaa. Rutiinitestissä oikosulkumoottoria ei kuormiteta eikä pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia mitata.

Asad ja muut (2020, s. 1481) toteavat, että moottorin virtaan perustuvia vika-analyysimenetelmiä (eng. *motor current signature analysis*, MCSA) on tutkittu paljon, koska ne ovat muita analyysitekniikoita yksinkertaisempia eivätkä vaadi rakenteellisia muutoksia tai moottorin purkamista. Kaikki moottorin viat vaikuttavat staattorivirtaan joillakin tietyillä taajuusalueilla, ja kyseisiä taajuuskomponentteja analysoimalla voidaan mahdollisesti tunnistaa erityyppisiä vikoja (Asad ja muut, 2020, s. 1481). Lee ja muut (2021, s. 7874) selittävät, että virtaan perustuvat vika-analyysimenetelmät voivat antaa tietoa myös vikojen vakavuusasteesta, mikä on tärkeä tieto tuotannon- ja huollon suunnittelun kannalta.

Leen ja muiden (2021, s. 7874) mukaan moottorin virtaan perustuvia vika-analyysimenetelmiä on hyödynnetty jo yli 20 vuoden ajan, mutta niihin liittyen on raportoitu myös useita virheellisiä vika-analyysituloksia. He selittävät, että kyseisellä vika-analyysimenetelmällä on voitu saada virheellistä tietoa moottorin vioista. Vika-analyysissa on saattanut jäädä vikoja huomaamatta tai ehjiä roottoreita on diagnosoitu turhaan virheellisiksi (Lee ja muut, 2021, s. 7874).

Useimmat moottorin virtaan perustuvat vika-analyysimenetelmät käyttävät FFT:tä (eng. *Fast Fourier transform*) eli nopeita Fourier-muunnostekniikoita signaalinkäsittelyyn (Asad ja muut, 2020, s. 1481). FFT-menetelmiin liittyy jonkin verran rajoitteita, jotka voivat vaikuttaa mittauksen luotettavuuteen (Asad ja muut, 2020, s. 1481). Yksi näistä rajoitteista on spektrinen vuotoilmiö, joka tarkoittaa perustaajuisen komponentin vuotamista muiden peräkkäisten taajuusalueiden komponentteihin (Asad, 2020, s. 1481). Jos mittausajan pituus ja näytteenottotaajuuden suuruus eivät ole riittäviä, on todennäköistä, että vikaa ilmaisevat taajuuskomponentit hautautuvat perustaajuuden mittauskomponenttiin (Asad ja muut, 2020, s. 1481). Ongelma korostuu, kun mittauksia suoritetaan ilman kuormaa tai jos kuorma on hyvin pieni, koska vikojen aiheuttamat taajuudet ovat jättämän arvosta riippuvia (Asad, 2020, s. 1481).

Verkkonen (2017, s. 51) toteaa, että jättämä on suoraan verrannollinen roottorivastukseen ja momenttiin sekä kääntäen verrannollinen jännitteen neliöön. Tyhjäkäynnillä moottorin jättämä on siis hyvin pieni. Ilman lukkorautaa suoritettussa oikosulkutestissä jättämää saadaan suurennettua hieman, kun testissä käytetään alennettua jännitettä.

Toinen FFT-menetelmiin liittyvä ongelma se, että signaalin täytyisi olla jatkuva ja vakaassa tilassa (Asad ja muut, 2020, s. 1481). Ongelman merkitys kasvaa, kun vaihtosuuntaajat yleistyvät, sillä niillä syötetty jännite on väistämättä yliaaltopitoista, mikä voi tehdä taajuusspektristä epätarkan (Asad ja muut, 2020, s. 1481–1482). Ohjausalgoritmit voivat myös vaikuttaa yliaaltojen amplitudiin, ja esimerkiksi DTC (eng. *direct torque control*) eli suora vääntömomentin säätö vaikuttaa suoraan virtasignaaliin, joka sisältää

informaatiota moottorin vioista (Asad ja muut, 2020, s. 1482). Rutiini- ja tyyppitestipaikoilla on käytössä suora sähkönsyöttö moottoriin. Rutiinitestipaikoilla sähkönsyöttö tulee muuntajalta ja koekentällä generaattorilta. Rutiinitestipaikoilla jännitteen ja virran mittaukseen käytetään tehoanalysaattoria, joka mittaa jännitteen ja virran tehollisarvot.

5.2 Virran vikasignaali

Asadin ja muiden (2020, s. 1482) mukaan ideaalisen ja symmetrisen moottorin vaihevirta $i_a(t)$ voidaan esittää yhtälöllä

$$i_a(t) = \hat{i}_a \sin(\omega t + \alpha), \quad (7)$$

missä \hat{i}_a on virran huippuarvo, ω on kulmanopeus syöttötaajuudella ja α on vaihekulma. Jos roottorisauva tai roottorin kääminpäiden tukirenkaat ovat rikki tai laakerit ovat huonot, roottori muuttuu epäsymmetriseksi (Asad ja muut, 2020, s. 1482). Roottorin epäsymmetrisyys aiheuttaa vaihevirtaan taajuusriippuvaisen komponentin, joka riippuu roottorin pyörimisnopeudesta, ja vaikuttaa modulaatioindeksin arvoon, joka on riippuvainen vian vakavuudesta (Asad ja muut, 2020, s. 1482). Modulaatioindeksi tarkoittaa moduloitavan signaalin amplitudia suhteessa moduloimattoman perusaallon amplitudiin (IEC, 2017b).

Kun roottori on epäsymmetrinen, vaihevirta $i_{af}(t)$ voidaan esittää yhtälöllä

$$i_{af}(t) = [1 + m(t)]i_a(t), \quad (8)$$

missä $m(t)$ on modulaatiosignaali (Asad ja muut, 2020, s. 1482). Modulointisignaalilla on modulaatioindeksi M , jonka suuruus riippuu rikkinäisten roottorisauvojen lukumäärän N_b ja roottorisauvojen kokonaismäärän N_t suhteesta lähteiden (Asad ja muut, 2020, s. 1481; Bellini ja muut, 2001, s. 1251) mukaan

$$M \approx \frac{N_b}{N_t}. \quad (9)$$

Asad ja muut (2020, s. 1482) esittävät, että jos roottori pyörii ja käämityksen jännitteen jakauma on sinimuotoinen, myös modulaatiosignaali on sinimuotoinen. Modulaatiosignaali voidaan puolestaan esittää yhtälöllä

$$m(t) = M \cos(\omega_0 t + \phi), \quad (10)$$

missä ω_0 on kulmanopeus ominaisvikataajuudella f_0 , joka riippuu vian tyypistä ja moottorin jättämästä (Asad ja muut, 2020, s. 1482). Jos roottorivika johtuu rikkinäisistä roottorisauvoista, modulaatiosignaalin yhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$m(t) = M \cos(4\pi s f_s t + \phi), \quad (11)$$

missä ominaisvikataajuudelle pätee $f_0 = 2s f_s$, jolloin kulmanopeus on $\omega_0 = 2\pi(2s f_s)$ (Asad ja muut, 2020, s. 1482). Yhtälöissä s on moottorin jättämä ja f_s syöttötaajuus. Vastaavasti moottorin, jolla on rikkinäisiä roottorisauvoja, vaihevirta voidaan kirjoittaa seuraavasti

$$i_{af}(t) = [1 + M \cos(4\pi s f_s t + \phi)] i_a(t), \quad (12)$$

ja johtaa edelleen muotoon (Asad ja muut, 2020, s. 1482)

$$i_{af}(t) = [1 + M \cos(4\pi s f_s t + \phi)] \hat{i}_a \sin(\omega t + \alpha). \quad (13)$$

Bellini ja muut (2008, s. 4113) toteavat, että kenttäteoriaan perustuen roottorin epäsymmetriat aiheuttavat staattorivirran spektriin komponentin $(1-2s)f_s$, jossa s on moottorin jättämä ja f_s on syöttöjännitteen taajuus, kun oletetaan, että pyörimisnopeus on vakio tai hitausmassa on ääretön. He selittävät, että ilman näitä oletuksia, staattorivirran spektriin aiheutuu myös syöttötaajuuden yläpuolelle komponentti $(1+2s)f_s$, joka on todennettu kokeellisesti. Kun roottorin massa ei ole äärettömän suuri, komponentti $2s f_s$

aiheuttaa virtaan syklistä vaihtelua, joka vuorostaan aiheuttaa vaihtelua roottorin tuotamaan momenttiin (Tavner ja muut, 2008, s. 209). Vaihteleva roottorin momentti voi aiheuttaa vaihtelua myös pyörimisnopeuteen ja mekaaniseen värähtelyyn (Tavner ja muut, 2008, s. 209). Tavner ja muut (2008, s. 209) selittävät, että kyseiset muutokset nopeudessa vähentävät virran heiluntaa, heikentävät alempaa komponenttia $(1-2s)f_s$ ja tuottavat ylemmän komponentin $(1+2s)f_s$.

Asad ja muut (2020, s. 1482) esittävät, että roottorisauvavikaisen moottorin vaihevirran voi johtaa muotoon, jossa on huomioitu komponentit $(1\pm 2s)f_s$

$$i_{af}(t) = \hat{i}_a \sin(2\pi s f_s t) \left(\frac{M \hat{i}_a}{2}\right) [\sin(2\pi f_s (1+2s)t + \phi + \alpha) + \sin(2\pi f_s (1-2s)t + \phi + \alpha)] \quad (14)$$

Komponentit $(1\pm 2s)f_s$ jakautuvat tasaisesti perusaallon taajuuden molemmiin puolin, ja niitä kutsutaan yleensä sivukaistan komponenteiksi (Bellini ja muut, 2008, s. 4113). Komponenttien etäisyys perusaallon taajuudesta kasvaa, kun moottoria kuormitetaan (Bellini ja muut, 2008, s. 4113). Etäisyys on riippuvainen jättämästä (Tavner ja muut, 2008, s. 122). Tavnerin ja muiden (2008, s. 209) mukaan alemman sivukaistan taajuuskomponentin $(1-2s)f_s$ amplitudin ja syöttötaajuuden komponentin amplitudin välinen suhde ilmaisee roottorivian laajuutta.

Tavner ja muut (2008, s. 207–210) käsittelevät kirjassaan menetelmää, jossa moottoria kuormitetaan ulkoisella kuormalla ja moottori pyörii tasaisella nopeudella. He (2008, s. 122) kuitenkin toteavat, että roottorin vikoja voisi mahdollisesti olla helpompaa huomata moottorin käynnistysvaiheessa, kun jättämä on suurempi. Tässä työssä tarkastellaan, onko ilman ulkoista kuormaa ja alijännitteellä mahdollista huomata eroa moottorin staattorivirrassa. Muutosilmiön virta ei ole pysyvän tilan jaksottainen signaali, mikä vaikeuttaa myös sivukaistan komponenttien tunnistamista perinteisillä spektrianalyysimenetelmillä (Tavner ja muut, 2008, s. 122).

Tavner ja muut (2008, s. 210) esittävät, että virtaspektrin analysointi ei ole käytännöllinen menetelmä roottorin jatkuvaan seurantaan, mutta tutkimuksen voisi suorittaa tarvittaessa. Esimerkiksi staattorivirran heilunta voi viitata mahdolliseen vikaan (Tavner ja muut, 2008, s. 210). He myös muistuttavat, että vika-analyysin suorittavan henkilön pitää olla perehtynyt virtaspektrin analysointiin ja tulkintaan. Tässä diplomityössä testataan, aiheuttaako yksittäinen rikkinäinen roottorisauva vaihtelua moottorin staattorivirtaan.

5.3 Vikojen ilmeneminen tehoanalysaattorilla suoritetuissa mittauksissa

Rutiinitestipaikoilla tehtiin aiemmin roottorin pyöritystestejä, jos roottorissa epäiltiin olevan vikaa. Ohjeistuksen mukaan roottorin pyöritystesti voitiin tarvittaessa tehdä rutiinitestin yhteydessä, jos roottorin alumiinikäälämyksessä epäiltiin esimerkiksi valuvikaa (Similä, 2022, s. 9). Pyöritystestissä moottorille syötettiin oikosulkutestissä käytettyä alennettua jännitettä ja roottoria käännettiin akselista vähintään 180 astetta. Mittaus suoritettiin MotTest-mittausohjelmalla. Pyöritystestin aikana tarkkailtiin yhden vaiheen virtaa, ja se sai vaihdella enintään 3 prosenttia suhteessa kyseisen vaiheen virran keskiarvoon (Similä, 2022, s. 9). Pyöritystestiin valittiin tarkkailtavaksi sen vaiheen päävirta, jossa vaihtelu oli suurinta (Similä, 2022, s. 9).

Pyöritystestiä ei enää käytetä, koska se aiheuttaa työturvallisuusriskin. Koestajien täytyy turvallisuuksyistä pysyä testausalueen ulkopuolella ohjaamossa, kun moottoriin on kytketty syöttökaapelit ja jännitesyöttö on päällä. Ohjaamon oven täytyy olla kiinni, jotta moottorille voidaan kytkeä syöttöjännite, ja automaatio katkaisee syötön, mikäli ovi avataan kesken testin. Turvallisuuksriskin lisäksi pyöritystesti myös hidasti testausprosessia merkittävästi.

Tavnerin ja muut (2008, s. 209) esittävät, että roottorin epäsymmetrisyyden eli vian aiheuttama $2sf_s$ komponentti aiheuttaa virtaan heiluntaa, joka voidaan nähdä virtamittarilla. Tässä työssä tutkitaan, näkyykö roottorivika tehoanalysaattorilla suoritetuissa

mittauksissa, kun moottori pyörii vapaasti ilman ulkoista kuormaa. Rutiinitestipaikoilla ei ole tarkoituksena suorittaa varsinaista vika-analyysiä vaan tunnistaa mahdolliset viat. Vian ilmentyessä moottorille suoritetaan tarvittavat korjaustoimenpiteet. Jos rutiinitestissä havaitaan roottorivika, niin moottori puretaan ja roottori vaihdetaan. Tarkemmalle vian laadun tai vakavuuden analysoinnille ei siis rutiinitestipaikoilla ole tarvetta.

Mikäli roottorivika aiheuttaa tavanomaisesta poikkeavaa vaihtelua virrassa muutosilmiön aikana ja näkyy tehoanalysointilla mitatun virran kuvaajassa riittävän selvästi, niin MotTest-mittausohjelmistoon voisi mahdollisesti kehittää algoritmin, joka vertaa kunkin vaiheen päävirran vaihtelua. Mittausmenetelmä muistuttaisi toimintaperiaatettaan hieman aiemmin käytettyä pyöritystestiä ja voisi tarjota lisätietoa roottorin tilasta. Tällainen mittausmenetelmä saattaisi kuitenkin vaatia vielä matalamman alijännitteen ja hitaamman pyörimisnopeuden, kuin ilman lukitusrautaa suoritettavassa oikosulkutestissä.

6 Uudenlaisen mittausmenetelmän luotettavuus

Sähkötekniikassa näyte tarkoittaa mitattavaa suuretta, kuten virtaa, jännitettä tai taajuutta (Hiltunen ja muut, 2011, s. 79). Näyte edustaa aina jotakin itseään suurempaa kokonaisuutta ja sisältää epävarmuuden siitä, kuinka hyvin se edustaa tutkittavaa ilmiötä (Hiltunen ja muut, 2011, s. 79). Kaikkiin mittausnäytteisiin pätevät tietyt matemaattiset lainalaisuudet riippumatta näytteen olomuodosta (Hiltunen ja muut, 2011, s. 76). Näytteiden perusteella voidaan laskea esimerkiksi otoksen keskiarvo, keskihajonta tai mittauksen epävarmuutta kuvaavia lukuja (Hiltunen ja muut, 2011, s. 76). Tässä diplomityössä virran ja jännitteen mittaustulokset muodostetaan laskemalla vaiheiden päävirtojen ja -jännitteiden keskiarvot.

Näytteenottotaajuuden täytyy olla riittävän suuri, jotta näytteenotosta aiheutuva epävarmuus pienenee. Hiltunen ja muut (2011, s. 84) selittävät, että muutostilassa olevan mittauskohteen tulosten tulkitsemiseen tarvitaan signaalinkäsittelyä ja mittaussignaalin analysointia. He toteavat, että mittaustieto saadaan yleensä sähköisenä signaalina, joka tuotetaan erilaisilla antureilla ja muuntimilla. Tässä työssä tehoanalysointia mittaustarkkuutta ja näytteenottotaajuutta arvioidaan vertaamalla mittaustuloksia oskilloskoopilla tehtyihin mittauksiin. Mittausmenetelmän soveltuvuutta ja mittaustulosten luotettavuutta arvioidaan vertaamalla uuden ja vanhan menetelmän mukaista mittaustietoa.

Mittaukset suoritettiin 2-napaiselle 315-runkokoon moottorille testipaikalla AL2A. Testattava moottori on tyypiltään M3GP 315SMA 2. Moottorin nimellisarvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. 2-napaisen testimoottorin nimellisarvot.

Jännite (V)	Kytkeä	Taajuus (Hz)	Teho (kW)	Pyörimisnopeus (r/min)	Virta (A)	Tehokerroin $\cos\phi$
400	D	50	100	2976	174	0,88

Oikosulkutestit toistettiin viidellä eri syöttöjännitteellä sekä lukitusraudalla että ilman lukitusrautaa. Mittaukset suoritettiin samanaikaisesti tehoanalysaattorilla ja oskilloskooppilla. Oikosulkutestit suoritettiin alijännitteellä. Automaatio-ohjelmassa valittiin jännite, jonka mukaan muuntaja valitsi syöttöjännitteen jännitetason. Mittaukset suoritettiin viidellä eri jännitteellä. Mitatut syöttöjännitteet ovat todellisuudessa hieman suurempia kuin automaatio-ohjelmassa valitut jännitteet automaatiosta ja testilaitteistosta riippuvista syistä johtuen. Pienimmillään mitattu syöttöjännite oli noin 14,25 % testattavan moottorin nimellisjännitteestä ja suurimmillaan noin 17,10 %.

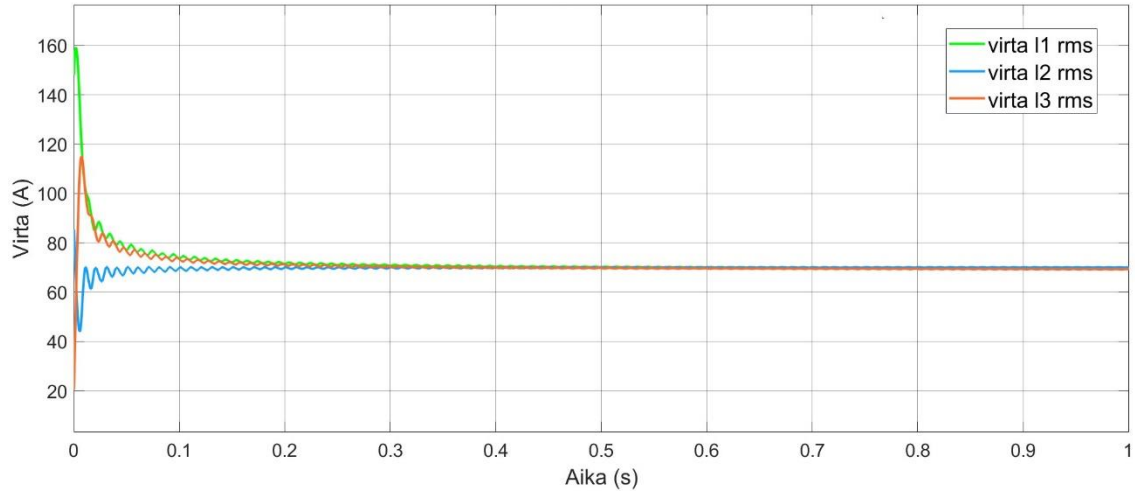
Mittauksissa käytetään rutiinitestipaikan omaa Fluke Norma 4000 -tehoanalysaattoria sekä Tektronix MSO44 -oskilloskooppia (ks. liite 2). Tehoanalysaattorin näytteenottotaajuus on 0,3–1 MHz (Fluke, 2007, s. 11-5). Näytteenottotaajuutta ei tarvitse valita manuaalisesti (Pantti, 2021, s. 3). Tehoanalysaattorin näytteenottotaajuus ei ole riippuvainen mittausajan pituudesta. Oskilloskoopin näytteenottotaajuus on 6,25 GS/s (Tektronix, 2022, s. 28). Yksikkö S/s tarkoittaa näytettä sekuntia kohden, eli kuinka monta näytettä oskilloskooppi kerää signaalista sekunnin aikana (Tektronix, 2012, s. 13). Yksiköt Hz ja S/s ovat siis verrannollisia. Tehoanalysaattori käyttää suurta näytteenottotaajuutta, mutta oskilloskooppi on kuitenkin huomattavasti tarkempi eli kerää enemmän näytteitä sekuntia kohden. Mikäli tehoanalysaattorin ja oskilloskoopin mittaustulokset ovat yhteneväisiä, tehoanalysaattorin näytteenottotaajuuden voidaan todeta olevan riittävän tarkka.

Tehoanalysaattori mittaa syöttöjännitettä ja virtaa testauskeskuksen kiskostosta. Tehoanalysaattorin virtamuuntajan mittausalueeksi valitaan manuaalisesti 600 mA. Virtamuuntajan kerroin on 1:400 A. Oskilloskooppi mittaa jännitettä testattavan moottorin kytkentäkotelosta kahteen eri vaiheeseen liitetyillä mittajohdoilla Tektronix THDP0100 -differentiaalimittapäätä käyttäen. Differentiaalimittapäällä voidaan mitata jopa 6000 V:n erojännitteitä eli jännitettä kahden mittapisteen väliltä (Tektronix, 2023, s. 2). Virtaa oskilloskooppi mittaa syöttökaapeleista Fluke i410 AC/DC-virtapihtimittareilla (ks. liite 3). Virtapihtimittarin jatkuvan virran mittausalue on 1–400 A, ja se voi mitata pienimmillään 0,5 A:n virtaa (Fluke, 2023a, s. 1–2). Tehoanalysaattori mittaa päävirtaa, ja oskilloskooppi

mittaa käämi- eli vaihevirtaa syöttökaapelista, joten virta ei ole suoraan verrattavissa, sillä testimoottorilla on kolmiokytkentä. Oskilloskoopin mittaamasta vaihevirrasta voidaan laskea päävirta kertomalla se kolmen neliöjuurella.

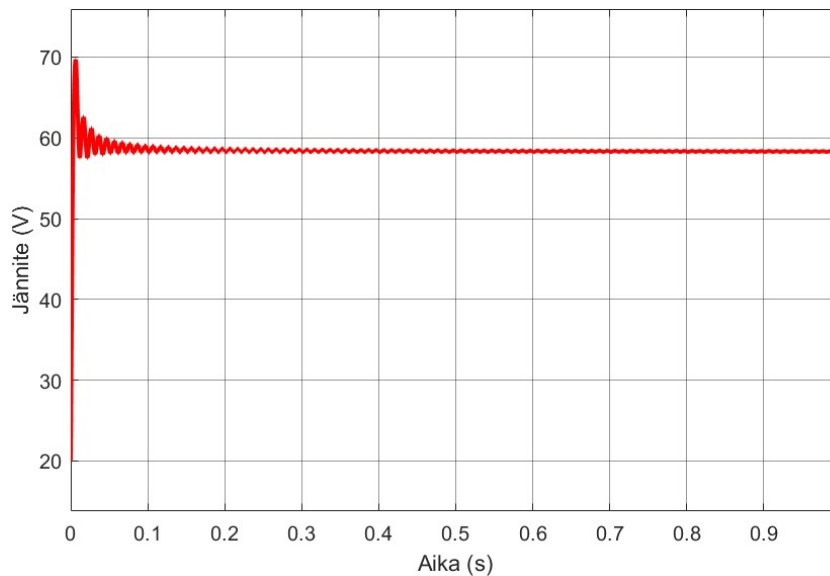
Oskilloskoopilla mitattua dataa käsitellään MatLab Simulink -ohjelmistolla, ja tehoanalysointin mittaustiedot siirretään MotTestistä Excel-tilukkolaskentaohjelmaan. Oskilloskoopilla mitatun virran sinimuotoinen kuvaaja muutetaan MatLab Simulink -ohjelmistolla tehollisvirran kuvaajaksi. Tehoanalysointilaskenta laskee mittaamastaan virrasta tehollisarvon, joten mittausohjelmistoon ja Excel-tilukkolaskentaohjelmaan siirretyt mittausnäytteet ovat virran tehollisarvoja.

Kuvassa 4 on esitetty vaihevirratt moottorin käynnistysvaiheessa, kun testattavan moottorin pyöriminen on estetty lukitusraudalla. Kuvaajan perusteella jännitesyötön kytkennän aiheuttama kytkentäsysäysilmiö kestää alle 0,1 sekuntia ja vaihevirtojen väliset erot tasoittuvat kuvaajan mukaan käytännössä lähes täysin ajanhetkeen $t = 0,4$ s mennessä. Vaihevirtojen kytkentäsysäysilmiöiden suuruuteen vaikuttaa roottorin asento hetkellä, jolloin syöttöjännite kytketään roottorille. Roottorin asento lukitusraudalla suoritettavassa oikosulkutestissä määrätty aina akselin kiilauran sijainnilla, sillä se vaikuttaa lukitusraudan kiinnityskohtaan. Vaihevirratt pysyvät samansuuruisina aikavälin $t = 0,4-1,0$ s.



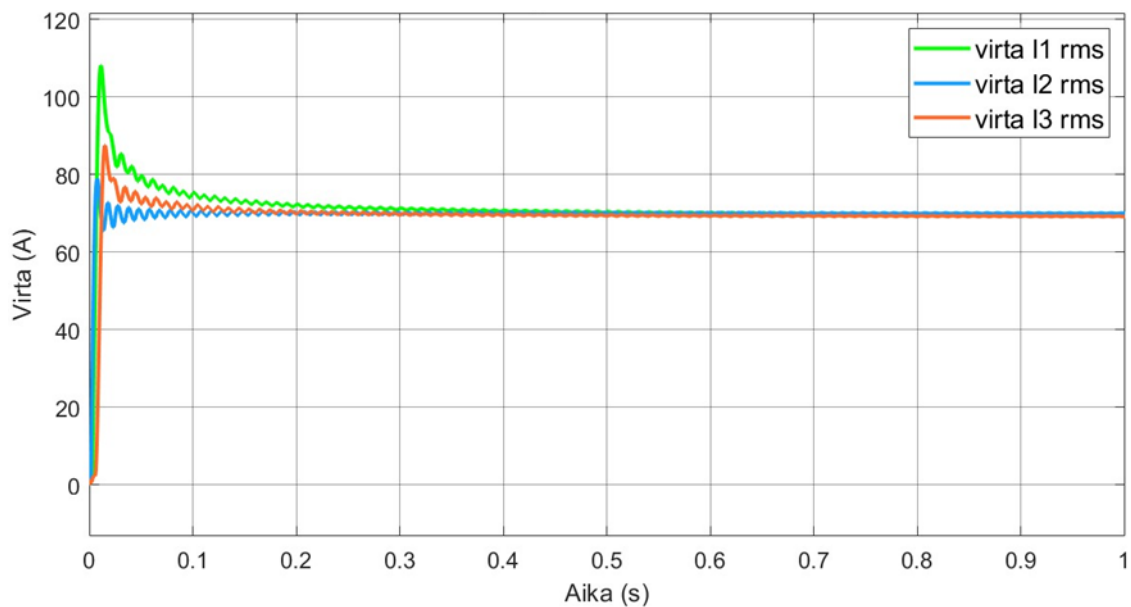
Kuva 4. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin vaihevirrat oskilloskoopilla mitattuna lukitusraudalla suoritettussa oikosulkutestissä.

Pääjännite puolestaan samasta tilanteesta eli lukitusraudalla suoritettussa oikosulkutestissä on esitetty kuvassa 5. Kyt kentäsysteemin jälkeen jännite stabiloituu hyvin nopeasti ja pysyy tasaisena. Kuvaajan perusteella pääjännite tasaantuu lähes täysin ajanhetkeen $t = 0,2$ s mennessä.



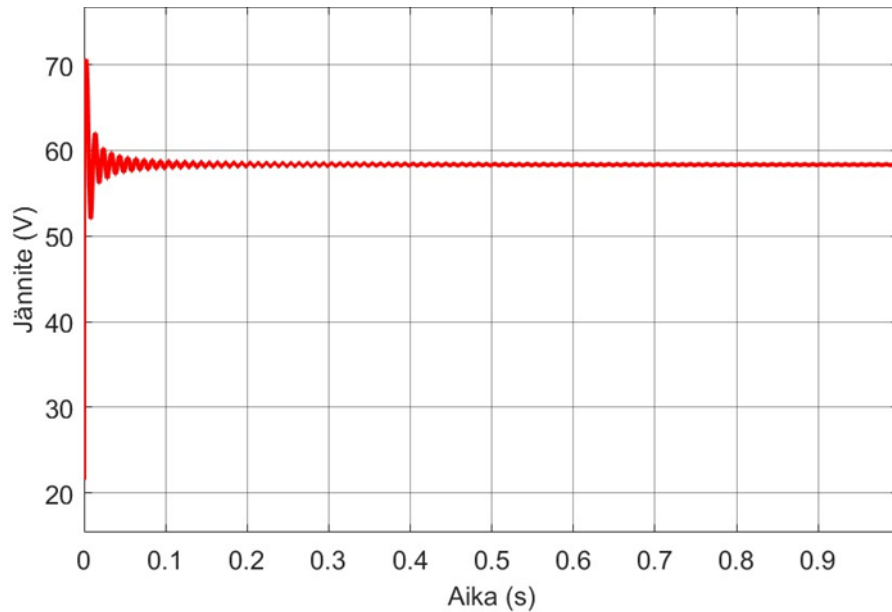
Kuva 5. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oskilloskoopilla mitattuna lukitusraudalla suoritettussa oikosulkutestissä.

Kuvassa 6 esitetään moottorin vaihevirrät käynnistysvaiheessa, kun testattavan moottorin akselin pyörimistä ei olekaan estetty. Ilman lukitusrautaa suoritettussa oikosulkutestissä vaiheen 1 kytkentäsäysvirran tehollisarvon huippu on noin 50 A pienempi kuin lukitusraudalla suoritettussa testissä. Kytkentäsäysilmiö on hieman erilainen lukitusraudalla suoritettuun testiin verrattuna, sillä kaikki vaihevirrät nousevat hetkellisesti. Lukitusraudalla suoritettussa testissä yhden vaihevirran kytkentäsäysilmiö oli päinvastainen eli virta laski. Kuvaajien perusteella kummallakin testausmenetelmällä vaihevirrät ovat kuvaajassa tasaantuneet ajanhetkellä $t = 0,4$ s.



Kuva 6. Ehjän 2-napaisen moottorin vaihevirrät oskilloskoopilla mitattuna ilman lukitusrautaa suoritettussa oikosulkutestissä.

Testattavan moottorin pääjännite ilman lukitusrautaa suoritettussa oikosulkutestissä esitetään kuvassa 7. Jännitteen kuvaajat lukitusraudalla suoritettussa oikosulkutestissä (kuva 5) ja roottorin pyöriessä vapaasti (kuva 7) ovat lähes identtiset.

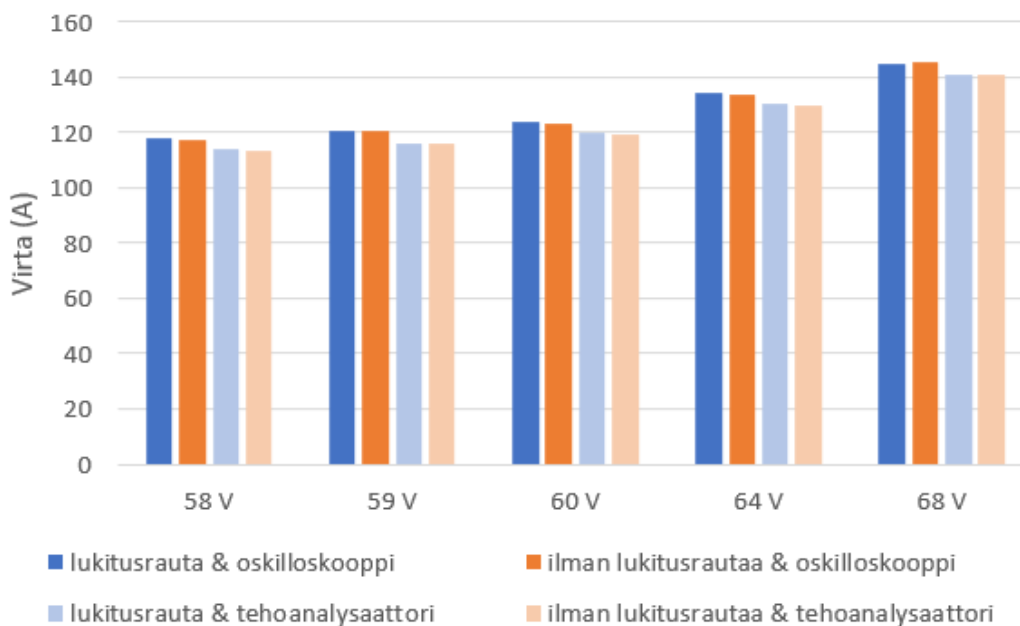


Kuva 7. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oskilloskoopilla mitattuna ilman lukitusrauta suoritetussa oikosulkutestissä.

Kuvassa 8 verrataan oskilloskoopilla ja tehoanalysaattorilla tehtyjä virran mittauksia ajanhetkellä $t = 1,5$ s. Edellä olevista kuvaajista nähdään, että jännitteen aiheuttama kytkentäsysäysilmiö tasaantuu täysin ajanhetkeen $t = 0,5$ s mennessä. Tavoitteena on kuitenkin mitata virta ja jännite mahdollisimman aikaisessa vaiheessa kytkentäsysäysvirran ja -jännitteen tasaannuttua, siis ennen kuin moottorin pyörimisnopeus alkaa kiihtyä ja virta laskea. 2-napaisella moottorilla käynnistyminen on hitaampaa ja muutosilmiön kesto on useita sekunteja. MotTest-mittausohjelmiston algoritmin diplomityön jälkeisessä kehityksessä täytyy kuitenkin ottaa huomioon se, että pienet moottorit kiihtyvät pysyvän tilan pyörimisnopeuteen nopeammin.

Oskilloskoopin mittaustulokset kerätään MatLab Simulink -ohjelmistolla luodusta kuvaajasta, ja tehoanalysaattorin mittaustulokset kerätään Excelistä. Mittaustulokset merkitään neljän numeron tarkkuudella. Oskilloskoopin mittamaat vaihevirrat kerrotaan kolmen neliöjuurella, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia tehoanalysaattorin mittaamien päävirtojen suhteen. Virroista lasketaan keskiarvo, jolloin saadaan yksi mittaustulos. Kuvan 8 vaaka-akselilla ilmoitetut syöttöjännitteet ovat tehoanalysaattorin mittaamia

pyöristettyjä arvoja. Oskilloskoopin mitaamat jännitteet olivat lähes samoja. Oskilloskoopin mitaamat jännitteet olivat noin 0,5 V pienempiä, ja ne olisivat tapauksesta riippuen pyöristyneet joko samaan kahdella merkitsevään luvun jännitearvoon kuin tehoanalyysoijan tulokset tai 1 V:n verran alhaisemmiksi.



Kuva 8. 2-napaisen oikosulkumoottorin oikosulkuvirrat ajanhetkellä $t = 1,5$ s 58 V, 59 V, 60 V, 64 V ja 68 V syöttöjännitteillä. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvasta 8 nähdään, että lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta suorittavien oikosulkutestien virroissa ei juurikaan ole eroa. Oskilloskoopin ja tehoanalyysoijan mittauksissa on pieni systemaattinen ero, joka voi selittyä eri mittauskohdilla. Oskilloskooppi mittaa jännitettä moottorin kytkentäkotelosta kahteen eri vaiheeseen liitetyillä mittajohdoilla, ja tehoanalyysoija mittaa jännitettä testauskeskuksen kiskostolta (ks. liite 1). Virran mittaukseen voi vaikuttaa se, että syöttökaapelit ja niihin kiinnitetyt Fluke i410 -virtapihitimittarit olivat melko lähekkäin.

7 Ehjän oikosulkumoottorin testaus AL2A-rutiinitestipaikalla

Tässä työssä suoritetaan mittauksia kahdelle oikosulkumoottorille, joiden runkokoko on 315. Moottorit ovat 2- ja 6-napaisia. Taulukkoon 2 on koottu testattavien moottoreiden tyypit ja tuotekoodit. 3GGP- ja 3GBP-alkuisen tuotekoodin mukaiset oikosulkumoottorit ovat rakenteeltaan umpinaisia, valurautarunkoisia ja häkkikämmittyjä, ja niiden jäähdytysmenetelmänä on akselituuletin (ABB oy, 2022a, s. 130; ABB oy, 2022b, s. 17). Tyypin M3GP moottorissa on lisäksi Ex ec -luokan suojaus, joka estää moottorin kipinöinnin viikatilanteessa (ABB oy, 2022a, s. 10). Testimoottorit ovat malliltaan jalallisia ja niissä on kytkentäkotelo moottorin päällä. Oikosulkutestit suoritetaan 50 Hz:n taajuudella. Syöttöjännite valitaan suunnittelijoiden laskemien arvojen perusteella. Suunnittelun laskemat syöttöjännitteet on ilmoitettu 1 V:n tarkkuudella.

Taulukko 2. Testattavien moottoreiden tyypit ja tuotekoodit.

Napaluku	Tyyppi	Tuotekoodi
2	M3GP 315SMA 2	3GGP311210-ADG + VC
6	M3BP 315SMC 6K	3GBP313230-ADK

Mittauksiin käytetään Fluke Norma 4000-mallin tehoanalysaattoria ja Teledyne LeCroy HDO6054- sekä LeCroy WaveSurfer 44Xs -oskilloskooppia (ks. liite 4 ja liite 5). Toisin kuin tehoanalysaattorin luotettavuutta arvioitaessa, muihin mittauksiin käytetään Teledyne LeCroyn ja LeCroyn oskilloskooppeja käytännön syistä, kuten saatavuudesta ja helppokäyttöisyydestä johtuen. Teledyne LeCroyn (2012, s. 15) ja LeCroyn (2006, s. 9) teknisten tiedotteiden mukaan kummankin oskilloskoopin näytteenottotaajuus on 2,5 GS/s eli hie- man pienempi verrattuna Tektronix MSO44-mallin oskilloskooppiin. Oskilloskooppien näytteenottotaajuus on kuitenkin huomattavasti suurempi kuin tehoanalysaattorin näytteenottotaajuus.

Virtamuuntajan muuntosuhde on 1:400 A. 2-napaisen moottorin testissä tehoanalysaattorin virtamuuntajan mittausalueeksi valitaan manuaalisesti 600 mA, ja 6-napaisen

moottorin testissä virtamuuntajan alue on 2 A. Virran mittaukseen käytetään Fluke i1000s AC Current Probe -mallin sekä Fluke 80i-1000s AC Current Probe -mallin virtapihtimittareita (ks. liite 6 ja liite 7), jotka kiinnitetään yhteen syöttökaapeliin. Ensimmäistä virtapihtimittaria käytettiin ehjien moottoreiden mittaukseen, ja jälkimmäistä roottori- vikaisten moottoreiden mittauksiin. Virtapihtimittareiden toimintatapa on samanlainen, mutta mittaria vaihdettiin mittalaitteen vallinneen saatavuuden vuoksi. Fluke i1000s AC Current Probe -mallin virtapihtimittarin perustarkkuudeksi on ilmoitettu 1 % +1 A (Fluke, 2023b, s. 2). Fluke 80i-1000s AC Current Probe -virtapihtimittarin tarkkuus on 2 % luke- masta, kun mittausalue on 5–1000 A (Fluke, n.d., s. 2). Kummankin virtapihtimittarin taa- juusalue on 5–100 000 Hz (Fluke, 2023b, s. 2; Fluke, n.d., s. 2). Virtapihtimittarin mittaus- alueeksi valitaan 1000 A, joka vastaa 1 mV/A:n ulostulon tasoa (Fluke, 2023b, s. 2; Fluke, n.d., s. 2).

Moottoreille suoritetaan aluksi perinteisen eli vanhan menetelmän mukainen oikosulku- testi lukitusraudalla. Ensimmäiseen mittaukseen käytetään MotTest-mittausohjelmiston tuotantoversiota, joka on käytössä rutiinitestipaikoilla ja koekentällä. Muihin mittauksiin käytetään MotTestin uutta versiota, joka ei ole testaushetkellä täysin valmis ja jota ei ole vielä vapautettu tuotannon käyttöön. MotTestin uutta versiota käytetään sekä lukitus- raudalla että ilman lukitusrautaa suoritettavissa testeissä. MotTest saa mittausdatan te- hoanalyysointilaitteelta. Mittauksia suoritetaan samanaikaisesti myös oskilloskoopilla, mutta sen mittaamaa dataa ei siirretä MotTest-mittausohjelmistoon. Tehoanalyysointilaitteella ja os- killoskoopilla mitattua dataa käsitellään Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. MotTest-mit- tausohjelmassa valitaan manuaalisesti, milloin oikosulku-testaus eli mittaus aloitetaan. Tehoanalyysointilaitteella kerää mittausnäytteitä noin 4 sekunnin ajan kontaktorin sulkeutumi- sesta lähtien.

7.1 Ehjä 2-napainen oikosulkumoottori

Taulukossa 3 on esitetty suunnittelun laskemat tarkastus- eli verifikaatioarvot oikosulkutestiä varten. Oikosulkutestin laskennallinen tarkastusarvo on 14,25 prosenttia testimoottorin nimellisjännitteestä.

Taulukko 3. Suunnittelun laskemat tarkastusarvot 2-napaiselle testimoottorille oikosulkutestiä varten.

Jännite (V)	Taajuus (Hz)	Oikosulkuteho (W)	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkutehokerroin $\cos\phi_k$
57	50	2680	113	0,24

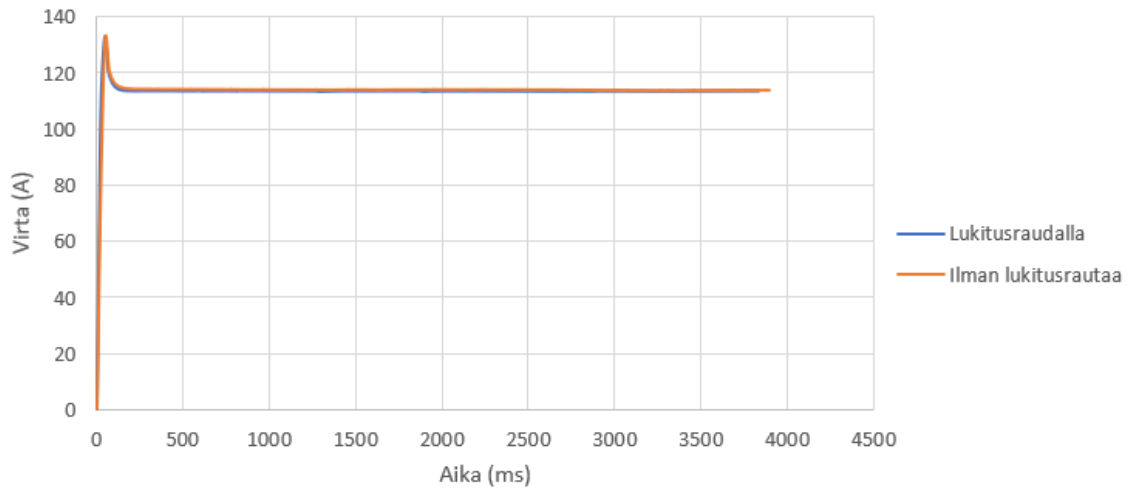
Moottorin oikosulkutestissä MotTestiin tulostuu kuvan 9 mukaisesti pääjännitteet U_1 , U_2 , U_3 ja niiden keskiarvo, oikosulkuvirrat I_1 , I_2 , I_3 ja niiden keskiarvo, vaiheiden oikosulkutehot P_1 , P_2 , P_3 ja niiden summa kokonaisuikosulkuteho P sekä vaiheiden oikosulkutehokerroimet ja niiden keskiarvo.

U	U	U₁	U₂	U₃	V
	58.2	58.31	58.18	58.1	
I	I	I₁	I₂	I₃	A
	113.6	113.9	113	113.9	
P	P	P₁	P₂	P₃	W
	2521	842.3	841.3	837.9	
Cos ρ	Cos ρ	Cos ρ₁	Cos ρ₂	Cos ρ₃	
	0.22	0.22	0.222	0.219	
TESTING VOLTAGE					
Freq	50	ΔU %		Limit %	OK
		VOLTAGE	2.1	3.0	
NETWORK VOLTAGE ASYMMETRY					
		U_{uvw} %	Limit %	OK	
		0.17	5.0		
EXPECTED VALUE					
	I_e	ΔI %	Limit %	Upper Limit %	
CURRENT	115 A	1.6	15	OK	OK
	P_e	ΔP %	Limit %	Lower Limit %	
POWER	2794 W	9.7	30	OK	OK

Kuva 9. Lukitusraudalla suoritetun oikosulkutestin mittaustulokset 2-napaiselle moottorille.

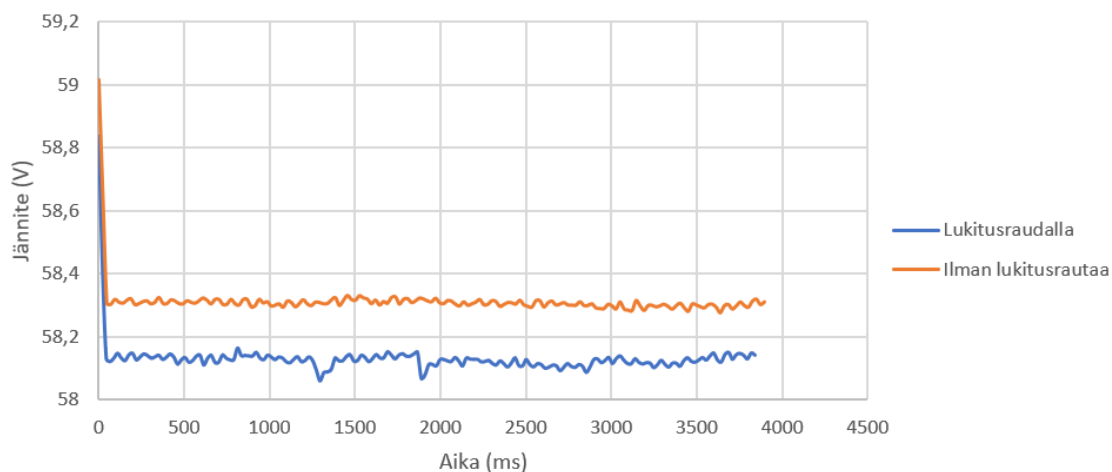
MotTest vertaa mittaustuloksia oikosulkuvirran ja -tehon odotusarvoihin I_{kme} ja P_{kme} (Siimilä, 2022, s. 8). Oikosulkuvirran ja -tehon odotusarvot on merkitty mittausohjelmistoon "Expected value"-otsikon alle. Odotusarvo tarkoittaa vertailuarvoa, joka muodostuu, kun MotTest korjaa taulukon 3 mukaista tarkastusarvoa mitattujen arvojen perusteella (ks. yhtälöt 3 ja 5). MotTest vertaa mitatun virran ja sen odotusarvon välistä suhdetta $\Delta I_{km\%}$ sekä mitatun tehon ja tehon odotusarvon välistä suhdetta $\Delta P_{km\%}$. Lisäksi MotTest vertaa jännitteen ja virran symmetrisyyttä eli vaiheiden välisten pääjännitteiden ja -virtojen poikkeamaa.

Lukitusraudalla tehtävän oikosulkutestin mittaustulokset olivat hyvin samankaltaisia, mutta ilman lukitusrautaa tehtävässä oikosulkutestissä moottorin pääjännitteet olivat hieman suuremmat. Kuvassa 10 on esitetty lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa suoritettavissa oikosulkutesteissä tehoanalysaattorilla mitatut virran keskiarvot ajan suhteen. Virran kuvaajat ovat lähes identtiset.



Kuva 10. Ehjän 2-napaisen moottorin päävirta oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0\text{--}4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Tehoanalysaattorilla mitattujen pääjännitteiden kuvaaja (ks. kuva 11) eroaa hieman oskilloskoopilla mitattujen pääjännitteiden kuvaajista (ks. kuvat 5 ja 7). Oskilloskoopilla mitatuissa kuvaajissa nähdään kytkentäsysäysjännite, mutta tehoanalysaattorilla mitatun pääjännitteen kuvaajassa ei vastaavaa ilmiötä nähdä. Kuvaajien välinen ero johtuu siitä, että tehoanalysaattori ja oskilloskooppi mittaavat jännitettä eri kohdista.



Kuva 11. Ehjän 2-napaisen moottorin pääjännite oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalyysoijalla mitattuna aikavälillä $t = 0\text{--}4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Pääluvussa 6 esitettyissä mittauksissa oskilloskooppi mittaa jännitettä testattavan moottorin kytkentäkotelosta kahteen eri vaiheeseen liitetyillä mittajohdoilla Tektronix THDP0100 -differentiaalimittapäällä. Tehoanalyysoijalla mitataan jännitettä testauskeskuksen kiskostolta ennen kontaktoria. Tehoanalyysoijalla havaitsee jännitteen jo ennen kontaktorin sulkemista, ja jännite putoaa noin 0,8 V:n verran, kun moottori eli verkon näkökulmasta kuorma kytkeytyy verkkoon.

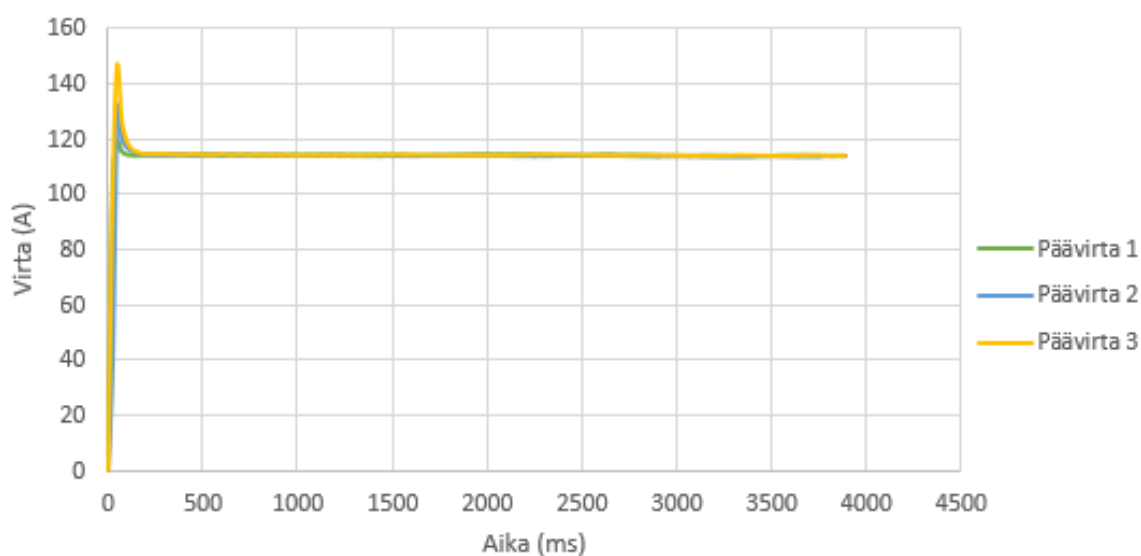
Kuvassa 11 on esitetty testimoottorin pääjännitteen keskiarvo ajan suhteen lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta suoritettavissa oikosulkutesteissä. Kuvaajasta nähdään, että eri mittausmenetelmien mukaan mitatut pääjännitteiden keskiarvot eroavat keskimäärin noin 0,2 V, kun jännite on tasaantunut. Lukitusraudalla suoritettavissa oikosulkutesteissä jännite vaihtelee hieman enemmän kuin ilman lukitusrauta suoritettavissa oikosulkutesteissä. Jännite-ero on hyvin pieni, ja jännitteeseen voi vaikuttaa esimerkiksi sähköverkon sen hetkinen kuormitus tilanne.

Käynnistysvaiheessa, ennen kuin roottori alkaa pyöriä, moottori on syöttävän verkon kannalta induktiivinen kuorma (Verkkonen, 2017, s. 34). Sekä lukitusraudalla että ilman lukitusrauta suoritettavissa oikosulkutesteissä oikosulkuvirran tehokerroin $\cos\phi_k$ on

pieni eli hyvin induktiivinen. Verkkonen (2017, s. 70) toteaa, että tehokerroin on voimakkaasti induktiivinen, kun sen arvo on 0,2–0,4 välillä. Etenkin suurilla moottoreilla käynnistysvirran tehokerroin on yleensä pieni (Verkkonen, 2017, s. 70).

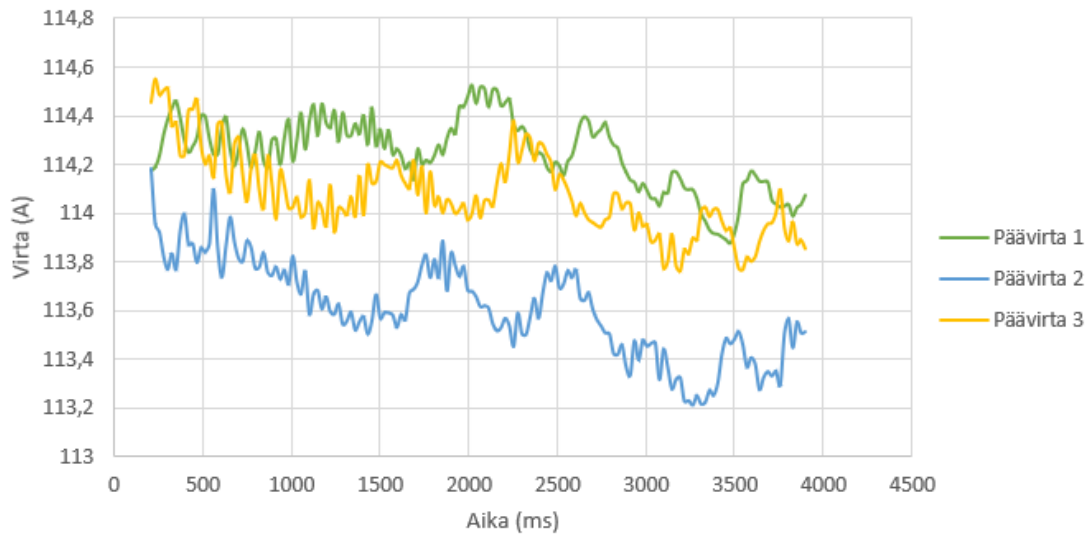
Oikosulkumoottorin jännite vaikuttaa oikosulkutehoon. Lukitusraudalla tehtävässä oikosulkutestissä testimoottorin oikosulkuteho on hieman matalampi kuin ilman lukitusrautaa tehtävässä testissä. Lukitusraudalla tehtävässä testissä moottorin oikosulkuteho on noin 2510 W, ja ilman lukitusrautaa tehtävässä testissä oikosulkuteho oli noin 2550 W.

Ehjän 2-napaisen moottorin virrat ilman lukitusrautaa suoritetussa oikosulkutestissä on esitetty ajan suhteen kuvassa 12. Sen kuvaajasta nähdään, että virtojen välillä ei juurikaan ole eroja.



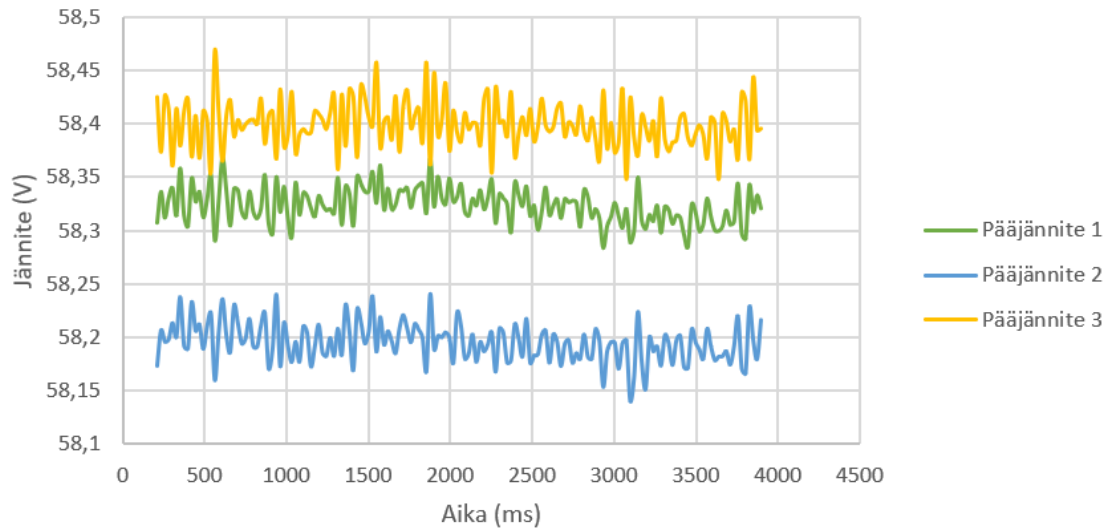
Kuva 12. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysointilaitteella mitattuna aikavälillä $t = 0\text{--}4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 13 on esitetty suurennettuna kuvaaja 2-napaisen moottorin päävirroista aikavälillä $t = 0,2\text{--}4$ s. Kuvaajasta on rajattu pois kytkentäsysäysilmiön suurin piikki eli aikajakso $t = 0\text{--}0,2$ s. Kuvaajasta nähdään, että tehollisvirrassa esiintyy pientä, alle 0,5 A:n suurista vaihtelua. Päävirtojen välinen ero on enimmillään noin 1 A.



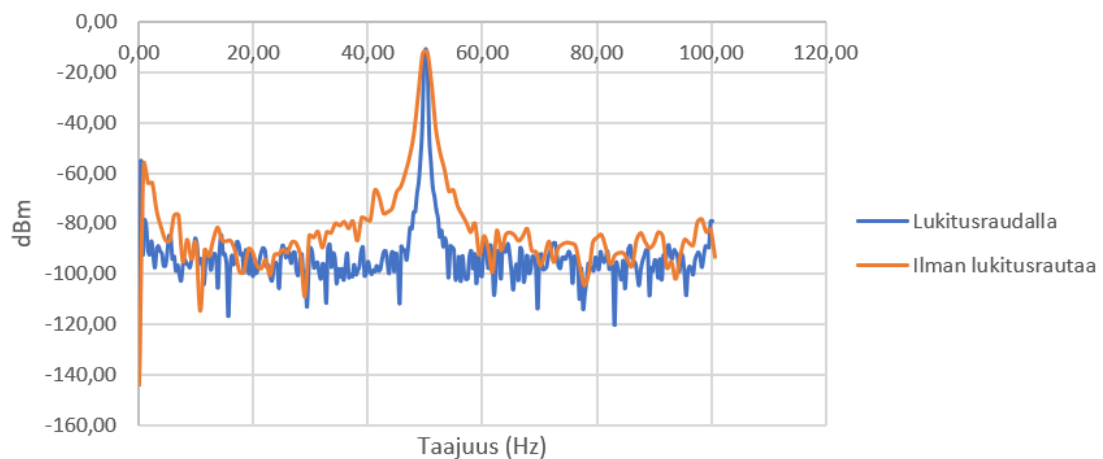
Kuva 13. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysointilaiteella mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Oikosulkumoottorin pääjännitteet aikavälillä $t = 0,2-4$ s on esitetty kuvassa 14. Pääjännitteissä esiintyy hyvin pientä vaihtelua, joka näyttää olevan suuruudeltaan noin 0,1 V tai vähemmän. Pääjännitteiden välinen ero on enimmillään noin 0,3 V.



Kuva 14. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Teledyne LeCroy HDO6054 -oskilloskooppi muodostaa virran spektrin nopealla Fourier-muunnosmenetelmällä. Kuvassa 15 on esitetty perustaajuuden eli 50 Hz:n oikosulkuvirran spektri. Tulokset esitetään (desibelimilliwatti, taajuus) -asteikolla. Desibelimilliwatti (dBm) on logaritminen asteikko ja tarkoittaa tehoa suhteessa milliwattiin (Ryynänen, 2017, s. 19).



Kuva 15. Ehjän 2-napaisen oikosulkumoottorin oikosulkuvirran perustaajuuden spektri.

Tavnerin ja muiden (2008, s. 208) mukaan ideaalisen moottorin staattorivirrassa pitäisi näkyä syöttötaajuuden, eli tässä tapauksessa 50 Hz:n, yksittäinen komponentti. He toteavat, että muutokset moottorin kuormassa aiheuttavat virran spektriin sivukaistat. Kun moottori käynnistetään alijännitteellä, roottorin hitausmassa toimii kuorman tavoin (Asad ja muut, 2020, s. 1485).

7.2 Ehjä 6-napainen oikosulkumoottori

6-napaisen moottorin nimellisarvot on esitetty taulukossa 4. Moottorin teho on hieman pienempi ja virta suurempi kuin 2-napaisella testimoottorilla. 6-napaisen moottorin nimellinen pyörimisnopeus on myös pienempi kuin 2-napaisella moottorilla.

Taulukko 4. 6-napaisen testimoottorin nimellisarvot.

Jännite (V)	Kytkeä	Taajuus (Hz)	Teho (kW)	Pyörimisnopeus (r/min)	Virta (A)	Tehokerroin $\cos\phi$
400	D	50	75	994	136	0,84

Suunnittelun laskemat tarkastus- eli verifikaatioarvot on esitetty taulukossa 5. Oikosulkutestin laskennallinen tarkastusarvo on 21,75 prosenttia 6-napaisen testimoottorin nimellisjännitteestä. Suunnittelu laskee alennetun jännitteen siten, että oikosulkutestin virta eli kuormitusvirta vastaisi moottorin nimellisvirtaa.

Taulukko 5. Suunnittelun laskemat tarkastusarvot 6-napaiselle testimoottorille oikosulkutestiä varten.

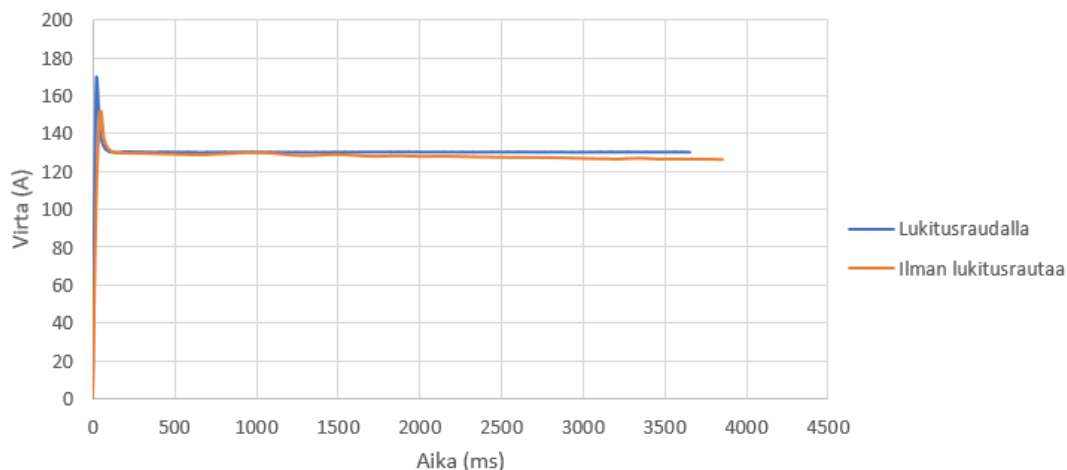
Jännite (V)	Taajuus (Hz)	Oikosulkuteho (W)	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkutehokerroin $\cos\phi_k$
87	50	4882	135	0,224

Vanhan menetelmän mukaisen lukitusraudalla suoritetun oikosulkutestin tulokset on esitetty kuvassa 16, joka on kuvakaappaus MotTest-mittausohjelmiston oikosulkutestin päänäköymästä.

U	U	U₁	U₂	U₃	V
	86.49	86.63	86.56	86.27	
I	I	I₁	I₂	I₃	A
	129.9	130	129.9	129.6	
P	P	P₁	P₂	P₃	W
	4271	1448	1413	1411	
Cos ρ	Cos ρ	Cos ρ₁	Cos ρ₂	Cos ρ₃	
	0.22	0.223	0.218	0.219	
Freq 50					
TESTING VOLTAGE			NETWORK VOLTAGE ASYMMETRY		
	ΔU %	Limit %		U_{uvw} %	Limit %
VOLTAGE	0.59	3.0	OK	0.16	5.0
			OK		OK
EXPECTED VALUE		COMPARISON OF MEASURED AND EXPECTED		ASYMMETRY BETWEEN PHASES	
	I_e	ΔI %	Limit %	I_{uvw} %	Upper Limit %
CURRENT	134 A	3.2	15	0.06	5.0
			OK		OK
	P_e	ΔP %	Limit %		Lower Limit %
POWER	4825 W	11.5	30		0.0
			OK		

Kuva 16. Lukitusraudalla suoritetun oikosulkutestin mittaustulokset 6-napaiselle moottorille.

Kuvassa 17 verrataan lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta suoritetuissa oikosulkutesteissä mitattuja päävirtoja. Kuvaajassa esitetään päävirtojen keskiarvot ajan suhteen.

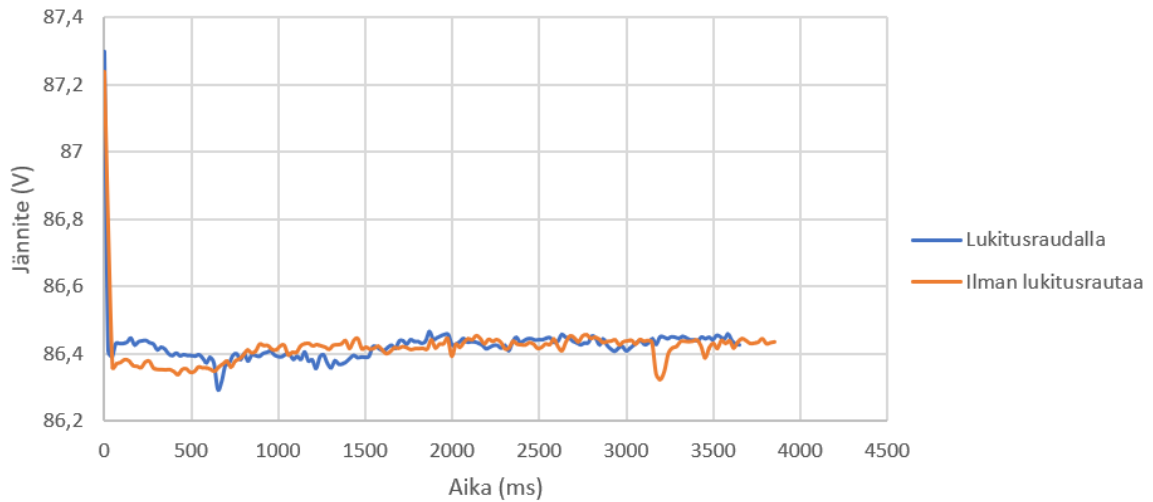


Kuva 17. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirta oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa tehoanalyysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

2-napaisella testimoottorilla virran kuvaajat olivat lähes identtiset lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa suoritetuissa testeissä. 6-napaisen moottorin tuloksista kuitenkin huomataan, että virta alkaa jo ajanhetken $t = 1,5$ s jälkeen laskea, kun lukitusrautaa ei käytetä. Aikavälillä $t = 0,2-1,5$ s virran arvo on noin 128,5–130,2 A, joka vastaa vanhan menetelmän mukaisia, lukkoraudalla tehdyn oikosulkutestin tuloksia (kuva 17). Lukkoraudalla tehdyssä oikosulkutestissä keskiarvoistetun virran arvo vaihtelee välillä 129,9–130,3 A. Ajanhetkellä $t = 3,5$ s virran arvo on noin 126,7 A ilman lukitusrautaa suoritetussa oikosulkutestissä eli virta on laskenut 3,1 A:n verran.

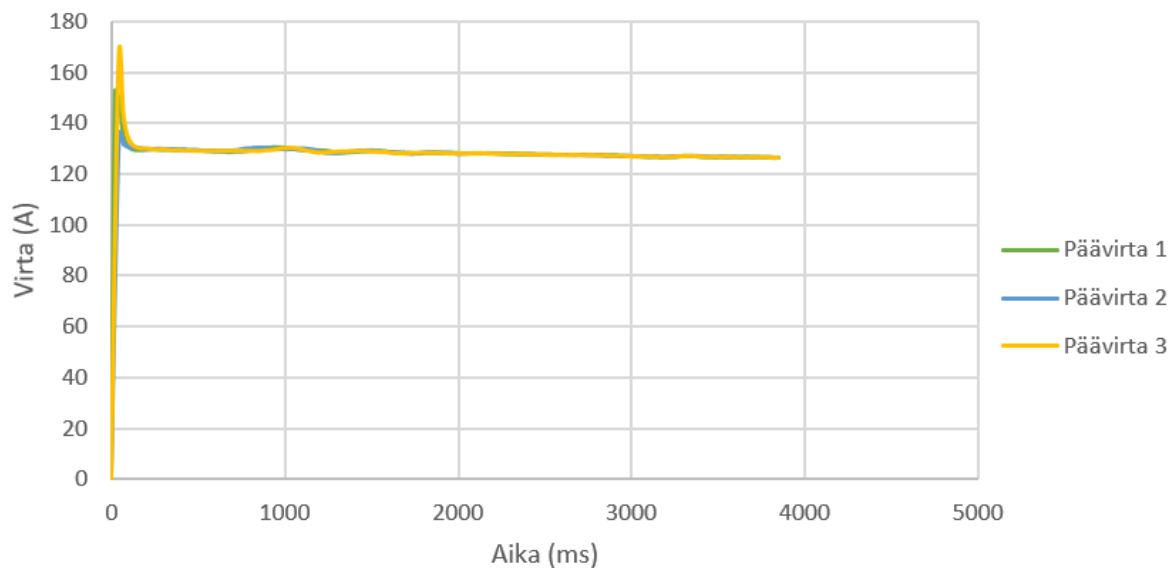
6-napainen moottori käynnistyy nopeammin kuin 2-napainen moottori, jolloin virran muutosilmiön kesto on lyhyempi ja moottori siis kiihtyy pysyvän tilan pyörimisnopeuteen nopeammin. 6-napaisella moottorilla virran alenema ei ole vielä kovin suuri mittauksen aikana. Tuloksista voidaan kuitenkin päätellä, että suuremman napaluvun moottorit tai pienikokoisemmat moottorit voivat kiihtyä täyteen pyörimisnopeuteen nopeammin. Tämä täytyy huomioida diplomityön jälkeisessä tulevassa mittausohjelmiston kehityksessä.

Kuvassa 18 on esitetty moottorin keskiarvoistettu pääjännite lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta suoritetuissa oikosulkutesteissä. Jännitteen suuruus on lähes sama kummallakin menetelmällä, ja jännite pysyy hyvin tasaisena.



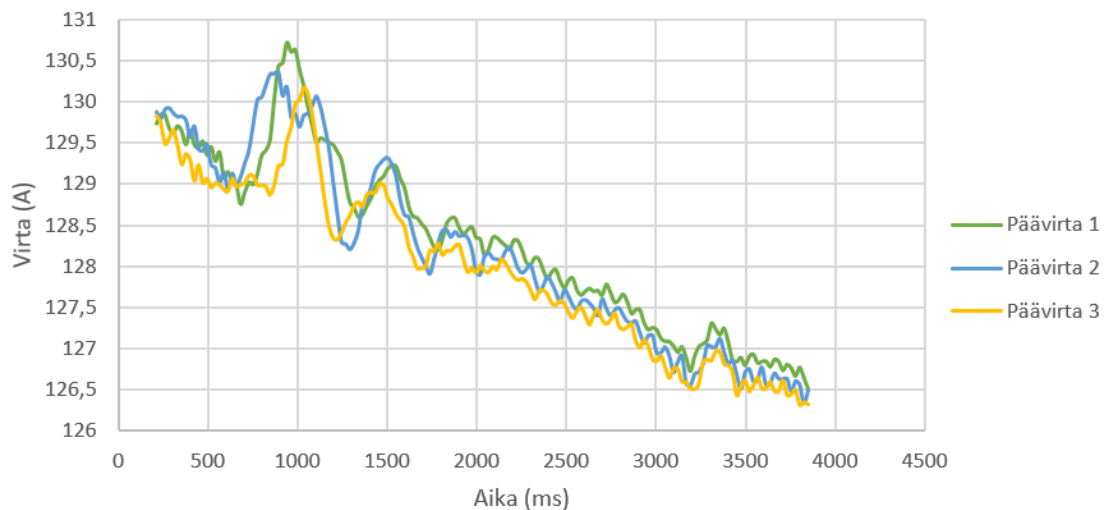
Kuva 18. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 19 on esitetty ehjän 6-napaisen moottorin päävirtojen tehollisarvot aikavälillä $t = 0-4$ s tehoanalysaattorilla mitattuna oikosulkutestissä, jossa moottorin akselia ei ole lukittu. Kuvaajasta nähdään, että vaihevirtojen välillä ei juurikaan ole eroa. Yhden vaiheen kytkentäsäysvirta on suurempi muihin verrattuna.



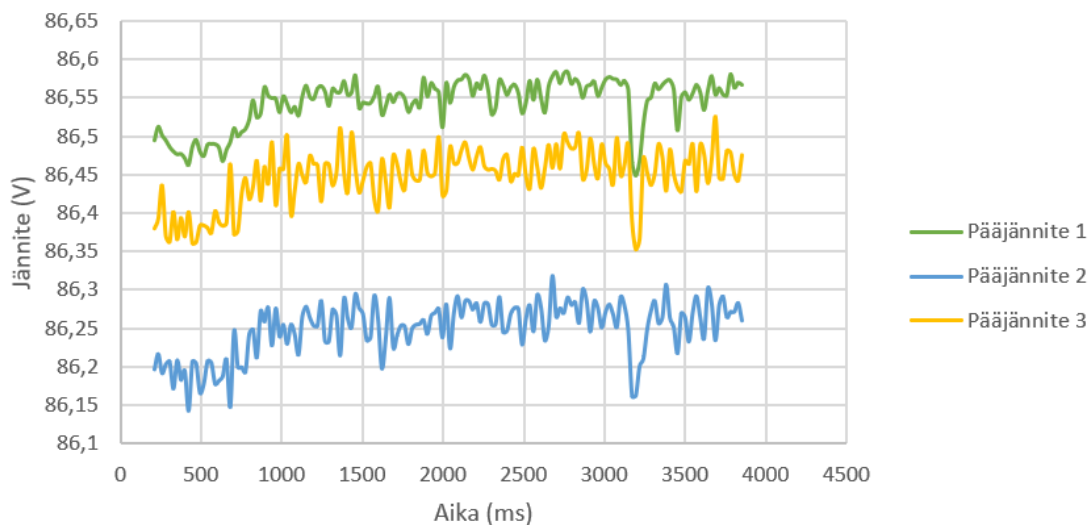
Kuva 19. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysointilaitteella mitattuna aikavälillä $t = 0\text{--}4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 20 esitetään suurennettuna kuvaaja 6-napaisen moottorin päävirroista aikavälillä $t = 0,2\text{--}4$ s. Kuvaajasta on rajattu pois aikajakso $t = 0\text{--}0,2$ s, jolloin kytkentäsysäysilmiön aiheuttama suurin vaihtelu esiintyy. Kuvaajasta nähdään, että tehollisvirrassa on aikavälillä $t = 0,6\text{--}1,3$ s pieni piikki, jonka jälkeen heilunta tasaantuu. Päävirta kuitenkin laskee nopeammin kuin 2-napaisen moottorin päävirta. Päävirta ehtii laskea noin 3,5–4 A:n verran ajanhetkeen $t = 3,7$ s mennessä. Päävirtojen välinen ero on enimmillään noin 0,6 A.



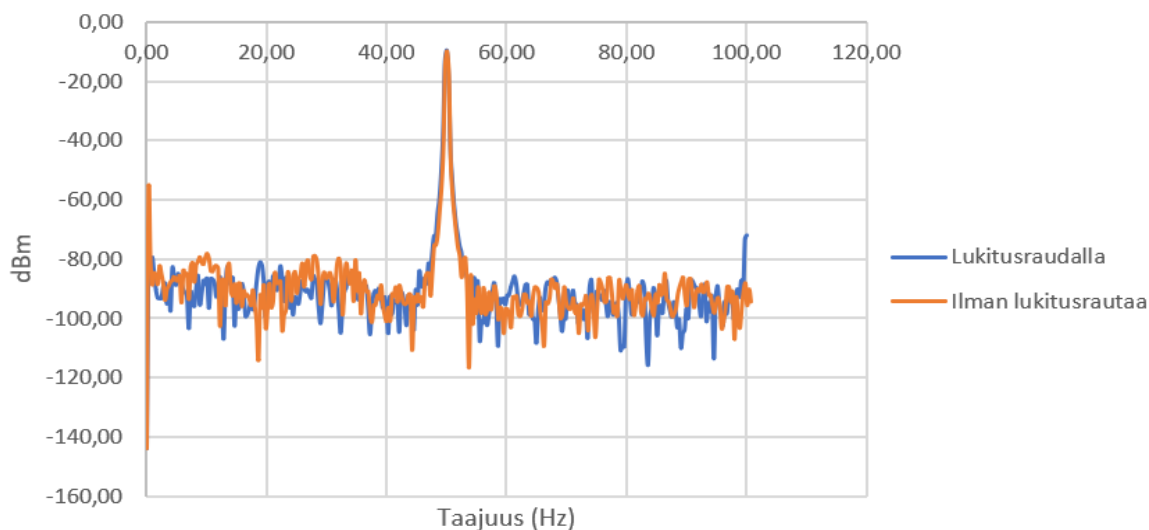
Kuva 20. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrauta tehoanalyysointilaiteella mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 21 on ehjän 6-napaisen moottorin pääjännitteiden tehollisarvot aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Pääjännitteet ovat melko tasaisia, ja ne vaihtelevat keskimäärin noin 0,5–1 V:n verran. Ajanhetkellä $t = 3,2$ s esiintyy noin 1,5 V:n suuruinen muutos, joka voi johtua esimerkiksi muutoksesta sähköverkossa. Pääjännitteiden välinen ero on alle 0,4 V.



Kuva 21. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Moottorin perustaajuuden oikosulkuvirran spektrit on esitetty kuvassa 22. Kuvasta nähdään, että lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa suoritetuissa oikosulkutesteissä on samannäköiset spektrit.



Kuva 22. Ehjän 6-napaisen oikosulkumoottorin oikosulkuvirran perustaajuuden spektri.

Ilman lukitusrautaa suoritettussa testissä 6-napaiselle moottorille ei muodostu spektri-kuvaajaan samanlaisia sivukaistan komponentteja kuin 2-napaisen testimoottorin spektrissä. Syynä voi olla esimerkiksi se, että moottori käynnistyy nopeammin, jolloin muutosilmiön kesto on lyhyempi. Moottorin hitausmassa kuormittaa moottoria vähemmän kuin 2-napaisen testimoottorin tapauksessa, ja jättämä on pienempi. Tavnerin ja muiden (2008, s. 112) mukaan sivukaistan komponenttien etäisyys perusaallon taajuudesta on riippuvainen moottorin jättämästä, ja Bellini ja muut (2008, s. 4113) toteavat sivukaistan komponenttien etäisyyden kasvavan, kun moottorin kuormitus suurenee.

8 Roottorivikaisen moottorin testaus AL2A-rutiinitestipaikalla

Tässä pääluvussa suoritetaan vastaavanlaiset oikosulkutestit kuin edellä, mutta roottorivikaiselle moottorille. Ehjien ja roottorivikaisten testimoottoreiden mittaustuloksia verrataan ensin perinteisen, lukitusraudalla tehtävän oikosulkutestin perusteella. Tämän jälkeen mittaukset toistetaan MotTest-mittausohjelmiston uudella versiolla lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa.

Molemmille testimoottoreille aiheutetaan roottorivika poraamalla yksi roottorisauvoista katki. Roottorisauvojen alumiinivalussa voi olla välillä esimerkiksi ilmakuplia, minkä takia sauva ei ole ehjä. Kuvassa 23 on esitetty 6-napaisen moottorin roottori, josta yksi roottorisauvoista on porattu rikki. Kummankin testimoottorin roottoreihin porattiin yksi säteen suuntainen reikä, joka on halkaisijaltaan 10 mm ja syvyydeltään noin 65 mm. Roottoreihin päätettiin tehdä vain yksi vika, jotta tilanne olisi mahdollisimman realistinen.



Kuva 23. 6-napaisen moottorin roottori, johon on porattu reikä.

Roottorivikaisten moottoreiden mittauksissa käytettiin pidempää mittausaikaa, jotta muutosilmiöstä saatiin enemmän mittausdataa. Mittauksiin käytetään MotTestin uutta versiota, ja mittauksen aloitusajankohta valitaan manuaalisesti. Tehoanalysaattori kerää mittausnäytteitä noin 7,5–8,5 sekunnin ajan kontaktorin pääkoskettimien sulkeutumisesta lähtien. Mittauksen aloitusajankohta valitaan manuaalisesti, joten mittaajan reaktioaika vaikuttaa mittausaikaan hieman.

Oikosulkutesti suoritettiin ensin lukitusrautamenetelmällä ja mittauksiin käytettiin MotTestin vanhaa tuotantoversiota. Taulukossa 6 on esitetty MotTestin laskemat oikosulkuvirran ja -tehon poikkeamat niiden odotusarvoista sekä päävirtojen välinen ero prosenttilukuina. Mitattu virta saa erota odotusarvosta enintään 15 prosenttia, ja oikosulkuteho saa erota odotusarvosta enintään 30 prosenttia (Similä, 2022, s. 8). Vaiheiden välisten virtojen ero saa olla maksimissaan 5 prosenttia (Similä, 2022, s. 8).

Taulukko 6. Vanhalla testausmenetelmällä tehtyjen mittausten tulosten vertailu.

	2-napainen testimoottori		6-napainen testimoottori	
	Ehjä moottori	1 viallinen roottorisauva	Ehjä moottori	1 viallinen roottorisauva
$\Delta I_{km\%}$	1,6	0,75	3,2	3,9
$\Delta P_{km\%}$	9,7	8,6	11,5	11
Päävirtojen epäsymmetria %	0,09	0,31	0,06	0,47

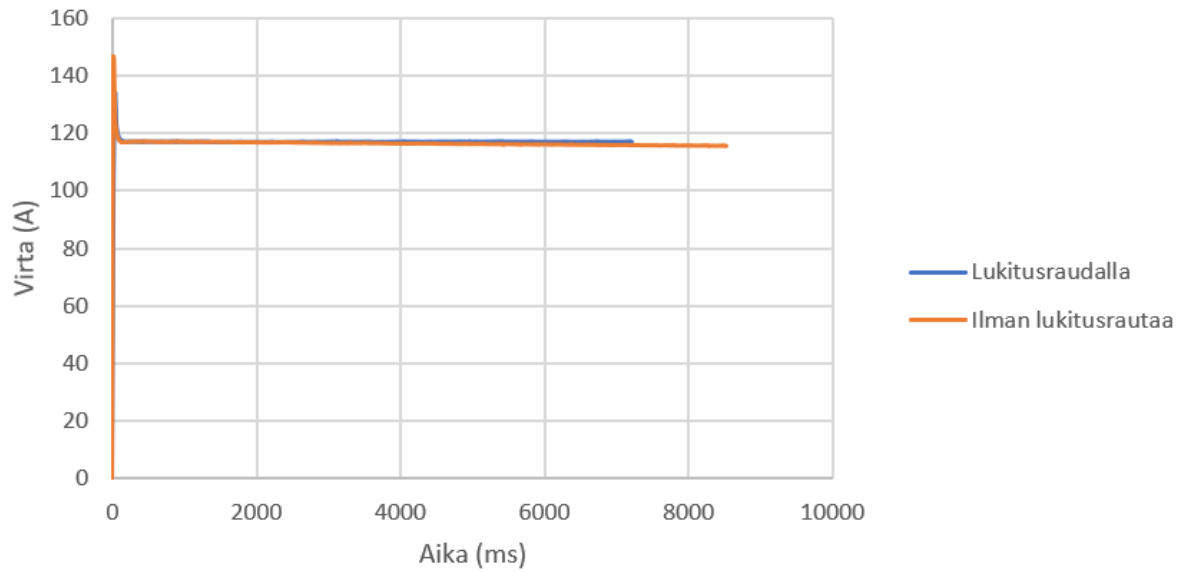
Yhtä rikkinäistä roottorisauvaa ei huomata vanhan menetelmän mukaisella oikosulkutestillä, sillä vertailuarvot pysyvät ennalta määritettyjen toleranssien rajoissa. Taulukosta 6 huomataan, että päävirtojen välinen ero on hieman pienempi tai suurempi viallisella roottorilla. Näiden tulosten perusteella ei kuitenkaan voida yksiselitteisesti sanoa, johduko tämä ero nimenomaan rikkinäisestä roottorisauvasta vai voiko kyseessä olla tavanomainen tuotannon vaihtelu. Päävirtojen välinen ero on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin 5 prosenttia, joka on määritetty tarkastusarvon ylärajaksi. Testilaitteiston

sähköisissä arvoissa voi esiintyä jonkin verran poikkeavuutta, ja mitattavat suureet ovat ideaalisesti sinimuotoisia jatkuvassa tilassa. Testit on suoritettu eri päivinä ja ajankohtina, joten muuntajalta tuleva syöttöjännite ei ollut täysin sama. Muuntajalta saatavaan syöttöjännitteeseen vaikuttaa esimerkiksi verkon sen hetkinen kuormitus tilanne.

Roottorivika ei myöskään näkynyt selvästi perustajuksen staattorivirran spektrikuvaajissa. Spektrikuvaajan taajuusresoluutio ei ollut riittävän tarkka, joten esimerkiksi roottorin hidas pyöriminen ei näkynyt spektrissä (J. Ikkäheimo, henkilökohtainen keskustelu, 19.4.2023). Taajuusresoluutio tarkoittaa kahden peräkkäisen taajuusalueen komponenttien välistä eroa, ja mitä pienempi ero niiden välillä on, sitä tarkempi on resoluutio voi olla (Asad ja muut, 2020, s. 1482). Signaalinkäsittelytekniikoissa taajuusresoluution eli erotelukykyyn täytyy olla riittävän hyvä, jotta pienet komponentit voidaan huomata (Asad ja muut, 2020, s. 1482).

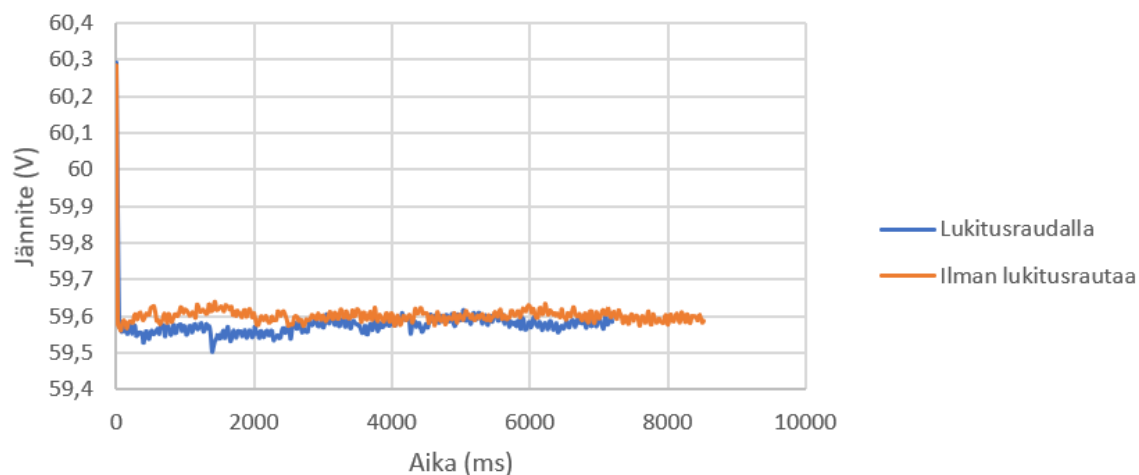
8.1 Roottorivikainen 2-napainen oikosulkumoottori

Kuvassa 24 vertaillaan 2-napaisen moottorin päävirran keskiarvoa lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta, kun yksi roottorisauvoista on porattu poikki. Moottorin kytkentäsysäysilmiö on hieman suurempi ilman lukitusrauta tehtävässä oikosulkutestissä. Virrat pysyvät useamman sekunnin tasaisina myös ilman lukitusrauta tehtävässä oikosulkutestissä. Kuvaajasta nähdään, että ajanhetkellä $t = 4$ s virta alkaa laskea hieman ilman lukitusrauta suoritettuna oikosulkutestissä, mutta ero testausmenetelmien välillä on hyvin pieni. Ilman lukitusrauta suoritettuna oikosulkutestissä virta laskee noin 1,4 A:n verran ajanhetkeen $t = 8$ s mennessä.



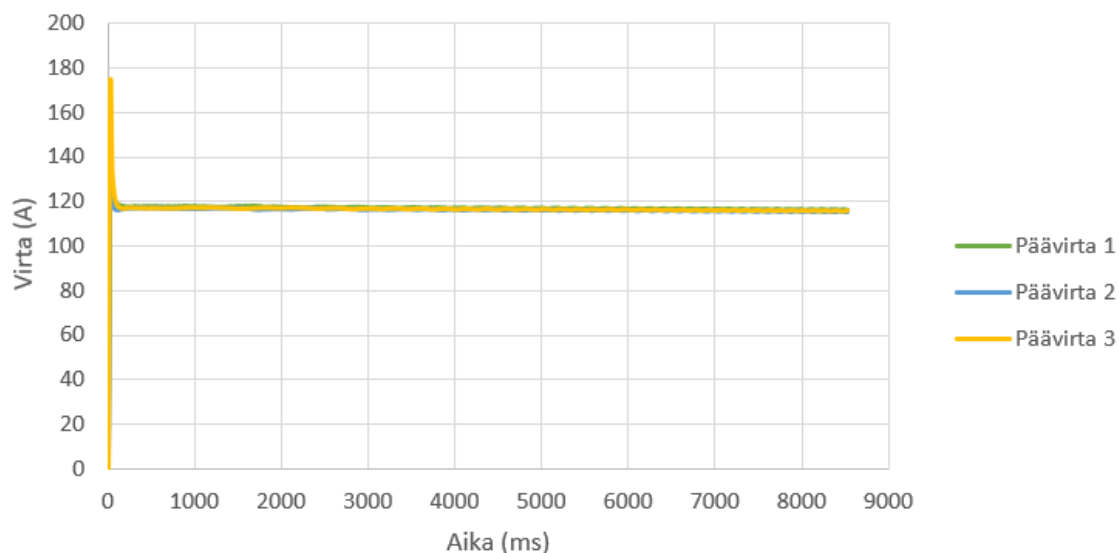
Kuva 24. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirta oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysointilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 25 verrataan moottorin keskiarvoistettua pääjännitettä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta suoritetuissa oikosulkutesteissä. Jännitteet pysyvät kummallakin menetelmällä hyvin tasaisina eivätkä ne juurikaan eroa toisistaan.



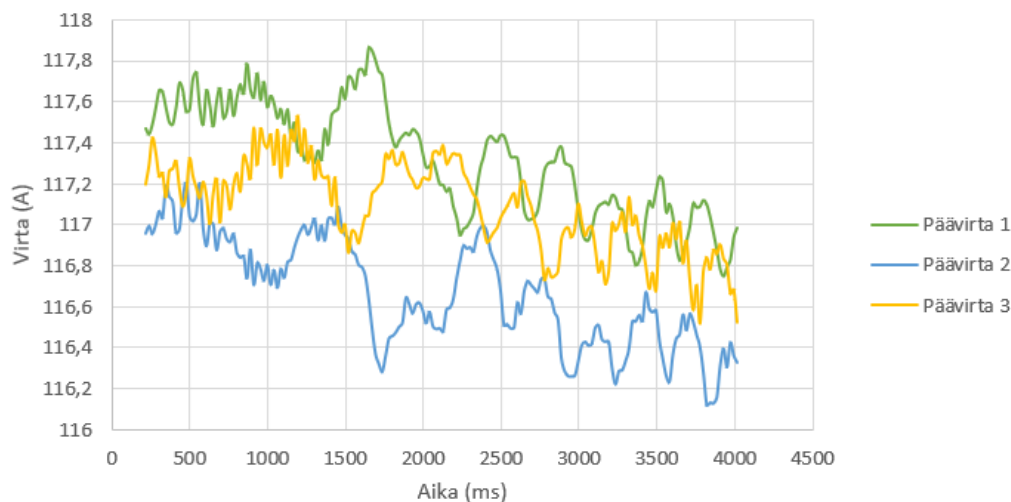
Kuva 25. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 26 esitetään roottorivikaisen oikosulkumoottorin päävirrat aikavälillä $t = 0-8,5$ s, kun oikosulkutesti on tehty ilman lukitusrautaa. Päävirran kytkentäsäysvirta on kuvan mukaan suurimmillaan 175 A.



Kuva 26. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8,5$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 27 esitetään 2-napaisen moottorin päävirrat ajanhetkellä $t = 0,2-4$ s, kun testattavan moottorin pyörimistä ei ole estetty lukitusraudalla. Kuvaajasta on rajattu pois kytkentäsysäysilmiö sekä mittausdata aikaväliltä $t = 4-8,5$ s, jotta päävirtojen kuvaajia voidaan tarkastella suuremmalla tarkkuudella. Päävirrat vaihtelevat keskimäärin noin 0,5 A. Päävirtojen välinen ero on suurimmillaan noin 1,55 A.

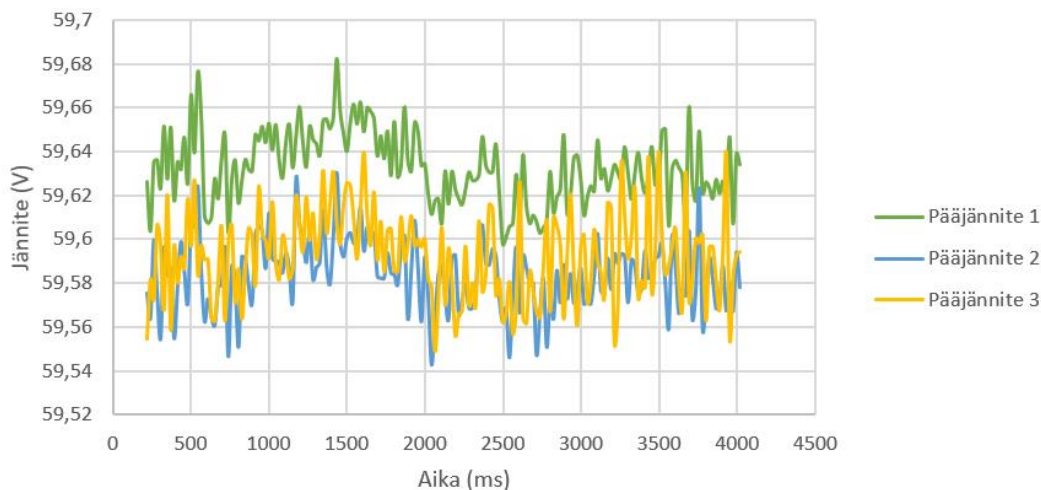


Kuva 27. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysointilaitteella mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Virroissa ei ole nähtävissä selvää vaihtelua tai virtapiikkejä, jotka osoittaisivat rikkinäisen roottorisauvan tunnistettavasti. Kuvaaja on hyvin samankaltainen verrattuna ehjän moottorin kuvaajaan (ks. kuva 13). Virrassa on noin 3 A:n suuruinen ero ehjään moottoriin verrattuna, mutta se johtuu asetetusta syöttöjännitteen arvosta.

Kuvassa 28 on 2-napaisen, roottorivikaisen testimoottorin pääjännitteet aikavälillä $t = 0,2-4$ s ilman lukitusrautaa suoritettussa oikosulkutestissä. Pääjännitteet pysyvät hyvin tasaisina, sillä pääjännite vaihtelee suurimmillaan noin 0,01 V. Pääjännitteiden

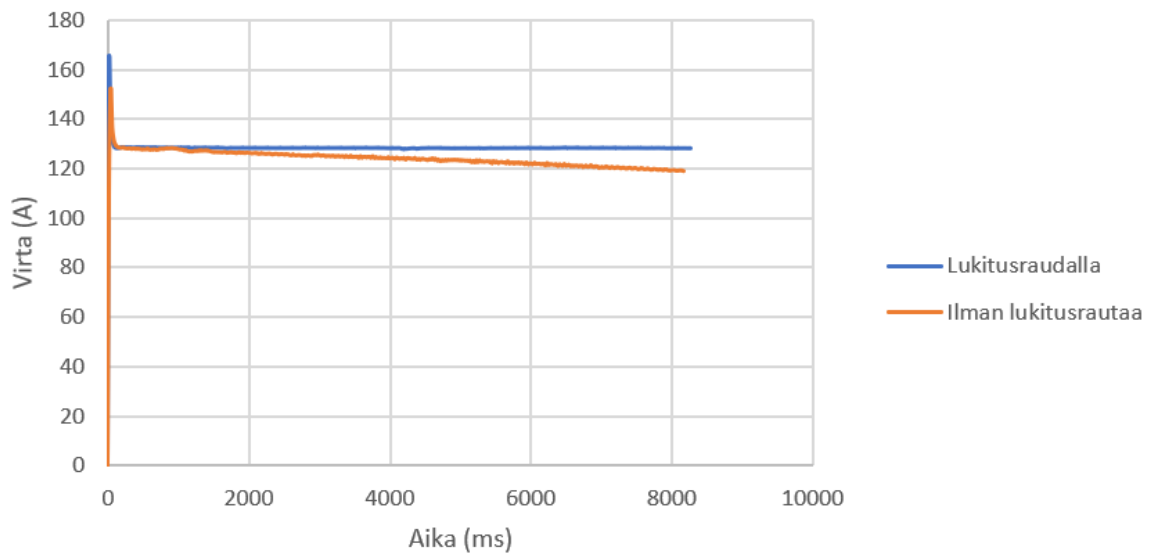
välinen ero on enimmillään noin 0,07 V. Pääjännite 3 vaihtelee aikavälillä $t = 0,25\text{--}4$ s enemmän kuin pääjännitteet 1 ja 2.



Kuva 28. Roottorivikaisen 2-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna ajanhetkellä $t = 0,2\text{--}4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

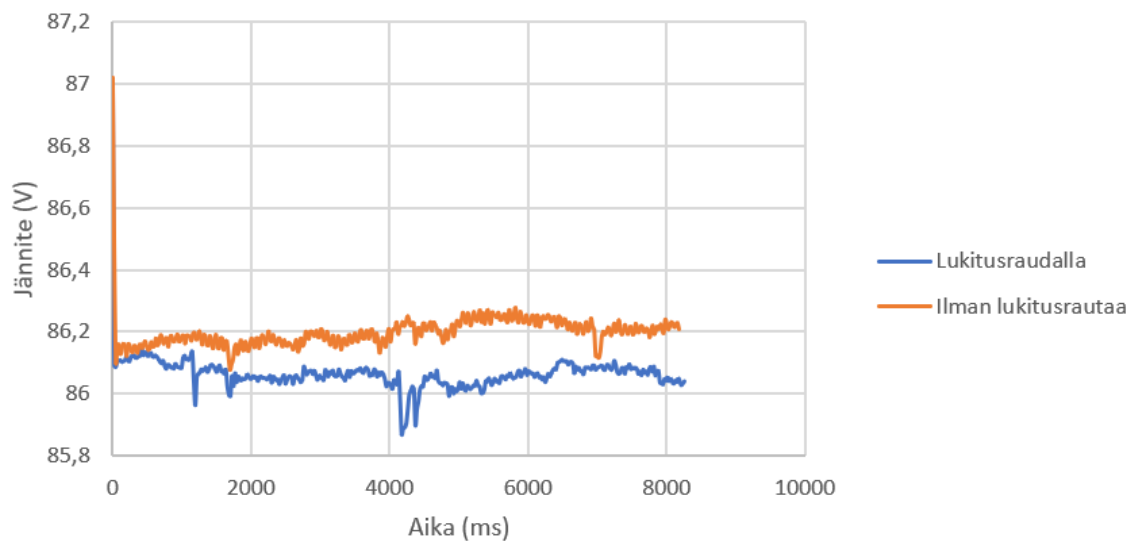
8.2 Roottorivikainen 6-napainen oikosulkumoottori

6-napaisen moottorin mittauksissa nähdään suurempi ero lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa tehtävien testausmenetelmien välillä. 6-napainen moottori käynnistyy ja kiihtyy nopeammin. Kuvassa 29 näytetään 6-napaisen moottorin keskiarvoistettu päävirta lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa aikavälillä $t = 0\text{--}8$ s, kun yksi roottorisauvoista on porattu poikki. Kuvaajasta nähdään, että virta alkaa laskea melko nopeasti ilman lukitusrautaa suoritettussa oikosulkutestissä. Virta ehtii pudota noin 9 A:n verran ajanhetkeen $t = 8$ s mennessä.



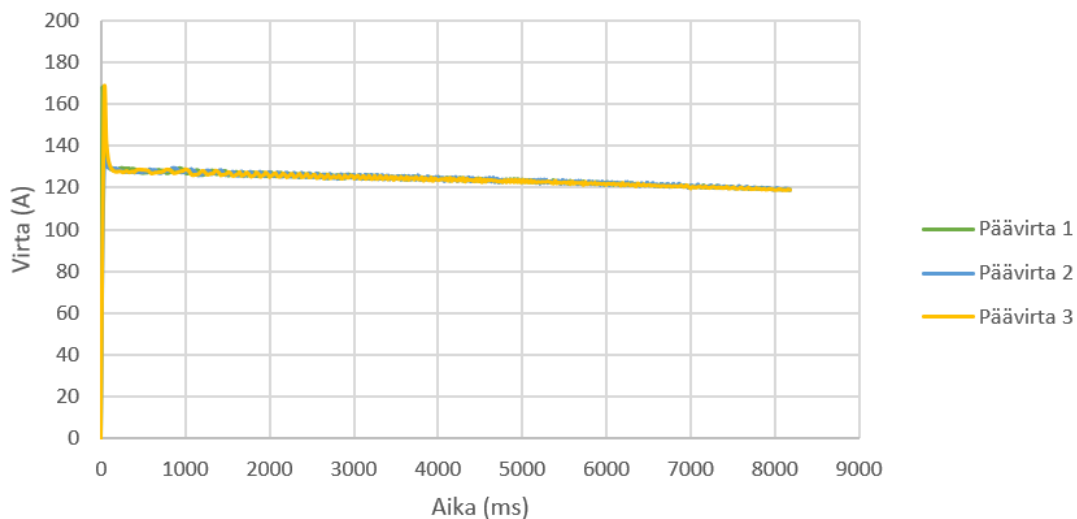
Kuva 29. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirta oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 30 vertaillaan 6-napaisen, roottorivikaisen oikosulkumoottorin pääjännitteitä lukitusraudalla ja ilman lukitusrauta aikavälillä $t = 0-8$ s. Jännitteiden välinen ero on hyvin pieni. Ilman lukitusrauta suoritettussa oikosulkutestissä jännite on noin 0,15 V korkeampi kuin lukitusraudalla tehtävässä testissä. Lukitusrautatestissä jännitteessä esiintyy muutamia yksittäisiä, hieman suurempia heilahteluita, mutta ilman lukitusrauta tehtävässä testissä jännitteen vaihtelu on erittäin pientä.



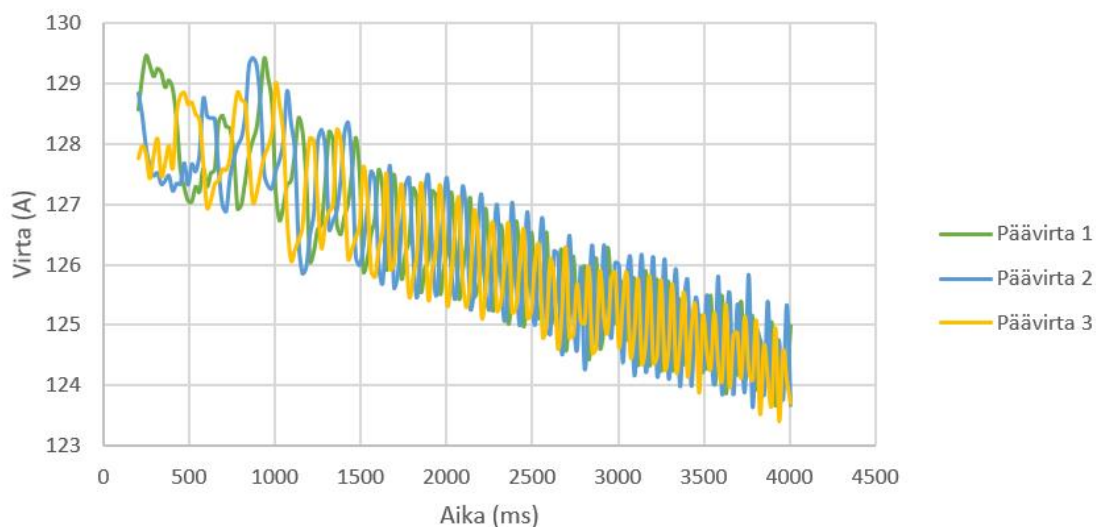
Kuva 30. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännite oikosulkutestissä lukitusraudalla ja ilman lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 31 esitetään roottorivikaisen oikosulkumoottorin päävirrat aikavälillä $t = 0-8$ s, kun oikosulkutesti on tehty ilman lukitusrautaa. Päävirran kytkentäsysäysvirta on suurimmillaan 170 A.



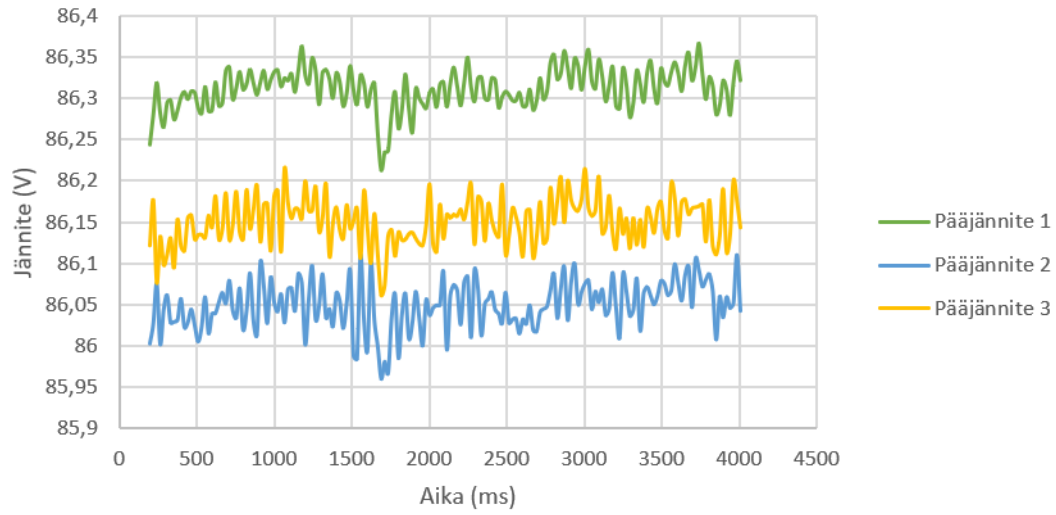
Kuva 31. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0-8,5$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvan 32 kuvaajista on rajattu pois kytkentäsysäysilmiö aikaväliltä $t = 0-0,2$ s sekä mitausdata ajanhetkestä $t = 4$ s eteenpäin, jotta päävirtoja nähdään tarkemmin. Päävirrat vaihtelevat noin 2 A:n verran, joka on enemmän kuin ehjällä moottorilla. Ehjällä moottorilla vaihtelu on suurimmillaan noin 0,6 A (kts. kuva 20). Päävirtojen välinen hetkellinen ero on enimmillään noin 2,5 A:n suuruinen.



Kuva 32. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin päävirrat oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysointilaitteella mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

Kuvassa 33 on 6-napaisen, roottorivikaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet aikavälillä $t = 0,2-4$ s ilman lukitusrautaa tehtävässä oikosulkutestissä. Pääjännitteet vaihtelevat enimmillään noin 1 V:n verran. Ajanhetkellä $t = 1,7$ s jännite putoaa hetkellisesti, mutta muuten jännite pysyy tasaisena. Pääjännitteiden välinen ero on enimmillään noin 0,35 V.



Kuva 33. Roottorivikaisen 6-napaisen oikosulkumoottorin pääjännitteet oikosulkutestissä ilman akselin lukitusrautaa tehoanalysaattorilla mitattuna aikavälillä $t = 0,2-4$ s. Ajanhetkellä $t = 0$ s moottorin staattoriin kytketään kolmivaiheinen jännite.

9 Oikosulkutestin mittausdatan käsittely ja analyysi

Mittaustulosten perusteella pohditaan, mitä täytyy ottaa huomioon mittausajankohdan ja -ajan määrittämisessä sekä mitaustulosten muodostamisessa. Lisäksi tarkastellaan, miten rikkinäinen roottorisauva vaikuttaa mitaustuloksiin ja voidaanko vikaa tunnistaa nykyisillä testausmenetelmillä ja mittalaitteilla. Vanhalla, tuotannossa käytössä olevalla testausmenetelmällä, tehoanalyysointikeräjä kerää mitaustuloksia viiden sekunnin ajan näytteenottotaajuudella 0,3–1 MHz, ja MotTest muodostaa mitaustuloksen laskemalla kerättyjen mitaustulosten keskiarvon. Mikäli ilman lukitusrautaa tehtävässä testissä päätetään laskea mitaustulosten keskiarvo, on tärkeää pystyä määrittämään keskiarvoistuksen pituus siten, ettei virta tai jännite ehdi muuttua liikaa ja siten vääristää mitaustulosta.

Tällä hetkellä MotTestin uusi versio ei vielä muodosta mitaustulosta automaattisesti, kun testi tehdään ilman akselin lukitusrautaa. MotTestiin on kuitenkin jo kehitetty algoritmi, joka valitsee yksittäisen mitaustuloksen siten, että syöttöjännite on mahdollisimman lähellä suunnittelun laskemaa tarkastusarvoa. MotTest valitsee mitaustuloksen aikaväliltä $t = 0,5\text{--}3$ s. Kyseinen aikaväli on alun perin valittu sen takia, jotta kytkentäsyysilmio voidaan rajata tarkasteluvälin ulkopuolelle. Tässä diplomityössä yksittäisen näytteen mukainen mitaustulos on valittu Excel-tilinlaskentaohjelmassa samojen määritelmien perusteella, eli mitaustulokseksi on valittu se rivi, jolla jännite on lähimpänä suunnittelun laskemaa jännitettä U_{km} .

Vanhan menetelmän mukaisia keskiarvoistettuja mitaustuloksia sekä uuden menetelmän avulla muodostettuja yksittäisiä mitaustuloksia ja keskiarvoistamalla muodostettuja tuloksia verrataan keskenään taulukoissa 7 ja 8. Keskiarvoistettujen mitaustulosten muodostamiseen on käytetty 1,5 ja 3 sekunnin keskiarvoistusaikojen aikaväleillä $t = 0,5\text{--}2$ s sekä $t = 0,5\text{--}3,5$ s. Taulukossa 7 esitetään ehjän 2-napaisen moottorin tulokset eri menetelmillä muodostettuina. Tulokset esitetään samalla tarkkuudella kuin MotTestin nykyisessä tuotannossa käytössä olevassa versiossa.

Taulukko 7. 2-napaisen ehjän moottorin oikosulkutestin tulokset.

	Lukitusraudalla	Ilman lukitusrauta		
		Yksittäinen mitausnäyte	1,5 s:n keskiarvoistusajalla	3 s:n keskiarvoistusajalla
U_{kmm} (V)	58,2	58,3	58,3	58,3
I_{kmm} (A)	113,6	113,8	114,0	114,0
P_{kmm} (W)	2521	2540	2552	2547
$\cos\phi_{kmm}$	0,22	0,22	0,22	0,22

Tuloksista nähdään, että mitatuissa jännitteissä ei juurikaan ole eroa MotTestin ilmoittamalla tarkkuudella. Suunnittelun määrittämä laskennallinen jännite 2-napaiselle testimoottorille on 57 V. Lukitusraudalla suoritettussa testissä mitattu jännite on 0,1 V pienempi kuin ilman lukitusrauta suoritetussa testissä, ja siten hieman lähempänä laskennallista jännitettä. Oikosulkuvirran ja -tehon odotusarvoa kuitenkin korjataan mitatun jännitteen ja taajuuden perusteella yhtälöiden 3 ja 5 mukaisesti, joten jännitteen poikkeama ei ole merkittävä mittaustuloksen kannalta. Nykyinen MotTest-versio tarkistaa, ettei mitattu jännite eroa laskennallisesta syöttöjännitteestä liikaa. Todellinen jännite saa erota laskennallisesta syöttöjännitteestä enintään 3 prosenttia, jotta mittaustulos hyväksytään.

2-napaisen moottorin laskennallinen oikosulkuvirta on 113 A. Mitattu virta on lähimpänä laskennallista oikosulkuvirtaa lukitusraudalla testattuna. Uudenlaisella testausmenetelmällä virta oli lähimpänä laskennallista oikosulkuvirtaa, kun mittaustulos on muodostettu yksittäisestä mittausnäytteestä, joka on valittu syöttöjännitteen perusteella. Laskennallinen oikosulkuteho on 2680 W, jota lähimpänä on 3 sekunnin keskiarvoitusajalla muodostettu mittaustulos ilman lukitusrauta suoritetussa oikosulkutestissä. Mittaustulosten välillä ei kuitenkaan ole suuria eroja.

Taulukkoon 8 on koottu ehjän 6-napaisen moottorin tulokset eri menetelmillä. 6-napaisen moottorin laskennallinen jännite oikosulkutestissä on 87 V. Moottorin laskennallinen oikosulkuvirta on 135 A ja oikosulkuteho 4882 W. Mitatuissa jännitteissä ei ole suurta

eroa keskenään, mutta lukitusraudalla tehdyssä testissä ja ilman lukitusrautaan tehdyn testin yksittäinen mittausnäyte ovat lähimpänä laskennallista syöttöjännitettä.

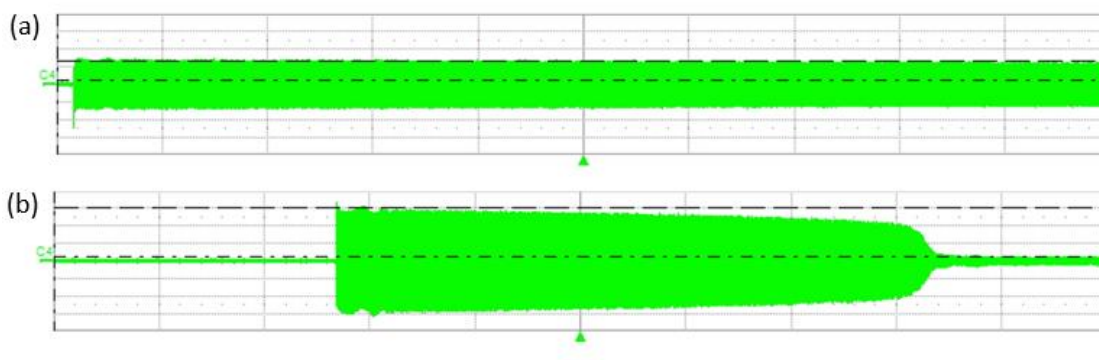
Taulukko 8. 6-napaisen ehjän moottorin oikosulkutestin tulokset.

	Lukitusraudalla	Ilman lukitusrautaan		
		Yksittäinen mittausnäyte	1,5 s:n keskiarvoistusajalla	3 s:n keskiarvoistusajalla
U_{kmm} (V)	86,5	86,5	86,4	86,4
I_{kmm} (A)	129,9	127,5	129,0	128,2
P_{kmm} (W)	4271	4252	4311	4279
$\cos\phi_{kmm}$	0,22	0,22	0,22	0,22

Yksittäisessä mittausnäytteessä oikosulkuvirta on kuitenkin pienempi verrattuna muihin mittaustuloksen muodostusmenetelmiin. Oikosulkutehoissa ei ole myöskään ole suuria eroja, ja kaikki ovat alle laskennallisen oikosulkutehon arvon. Oikosulkutehokertoimet ovat samansuuruisia kuten myös 2-napaisella moottorilla.

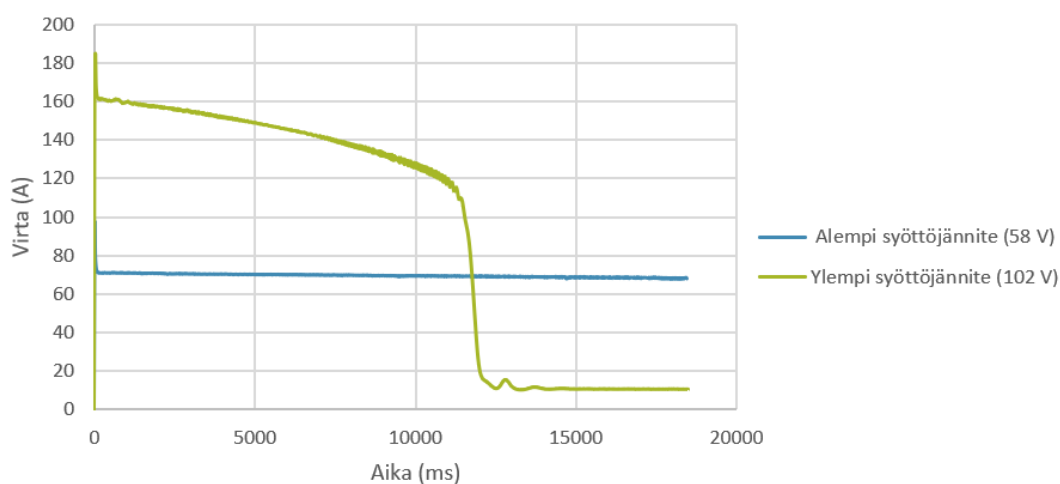
9.1 Mittausajankohdan ja -aikavälin määrittämiseen vaikuttavat tekijät

Mittausajankohdan ja -aikavälin valintaan vaikuttaa se, kuinka nopeasti moottori kiihtyy täyteen pyörimisnopeuteensa. Mitä lyhyempi moottorin muutosilmiö on, sitä lyhyempi myös mahdollinen mittausajanjakso on. Moottorin käynnistymis- ja kiihtymisnopeuteen vaikuttavat esimerkiksi moottorin napaluku, moottorin inertia ja syöttöjännitteen suuruus. Mittausaikaväliä määritettäessä täytyy rajata kytkentävaiheen sysäysilmiö pois ja huomioida, ettei virta ehdi laskea liikaa. Kuvassa 34 on esitetty oskilloskoopin muodostamat oikosulkuvirran verhoikäyrät 6-napaisen moottorin käynnistysvaiheessa kahdella eri syöttöjännitteellä. Syöttöjännitteiksi valittiin 58 V ja 102 V.



Kuva 34. Oikosulkuvirran verhoikäyrät 6-napaisen moottorin oikosulkutestistä ilman lukitusrautaa 58 V:n (a) ja 102 V:n (b) syöttöjännitteellä ajan funktiona.

Kuvassa 34 oskilloskoopilta saaduissa kuvaajissa esitetään virta ajan suhteen moottorin käynnistysvaiheessa 58 V:n ja 102 V:n syöttöjännitteillä. Virran huippuarvosta saadaan tehollisarvo jakamalla mitattu arvo kahden neliöjuurella. Kuvasta 34 nähdään, miten syöttöjännitteen valinta vaikuttaa testattavan moottorin käynnistymisaikaan. Kuvassa 35 esitetään samat oikosulkutestit tehoanalysaattorilla mitattuna. Tehoanalysaattorilla tehdyn mittauksen (kuva 35) ajallinen kesto on lyhyempi, joten virta ei ehdi juurikaan laskea tarkastelujakson aikana.



Kuva 35. 6-napaisen moottorin oikosulkuvirrat 58 V:n ja 102 V:n syöttöjännitteillä.

Yleisesti voidaan sanoa, että alemmalla syöttöjännitteellä virta pysyy huomattavasti pidempään tasaisena, ja suuremmalla syöttöjännitteellä virran muutosilmiö kestää lyhyemmän ajan. 6-napaisen moottorin virta putoaa aikavälillä $t = 0,2-5$ s noin 0,8 A:n verran, kun syöttöjännite on 58 V. Ylemmällä 102 V:n syöttöjännitteellä moottorin virta laskee noin 12 A samalla tarkasteluvälillä. Staattoriin syötettävä kolmivaiheinen jännite aiheuttaa staattorikäämiin magnetoimisvirran, joka aiheuttaa pyörivän magneettivuon (Verkkonen, 2017, s. 34). Syöttöjännitteen valinnalla voidaan vaikuttaa siihen, kuinka nopeasti oikosulkumoottori käynnistyy. Laskennassa täytyy huomioida myös testattavan moottorin sähkömagneettinen tila.

9.2 Mittaustulosten muodostaminen mittausnäytteistä

Ennen uudenlaisen testausmenetelmän käyttöönottoa on tärkeää pohtia, miten mittaus tulos olisi parasta muodostaa, jotta tulos olisi luotettava eikä hyödyllistä tietoa menetetä. Mittausmenetelmän luotettavuus on tärkeää myös siksi, ettei ehjiä moottoreita diagnosoida virheellisesti rikkiinäkiksi tai päinvastoin. Rutiinitestipaikan sähköisiin arvoihin voi tulla hetkellisiä heilahduksia tai muita muutoksia esimerkiksi sähköverkon kuormitustilan takia. Rutiinitestipaikan syöttöjännite saadaan suoraan muuntajalta, ja sähköverkkoon voi vaikuttaa muun muassa se, kuinka monta testipaikkaa käynnistetään samanaikaisesti tai mitä muita kuormia kyseisellä teollisuusalueella mittausaikana on.

Lukitusraudalla suoritettussa oikosulkutestissä mittauksia voidaan tarvittaessa toistaa useamman kerran, jos mittaus epäonnistuu tai keskiarvoistetun mittaustuloksen huomataan eroavan odotusarvosta poikkeuksellisen paljon. Satunnaiset heilahdukset moottorin sähköisissä arvoissa voivat joskus muuttaa mittaustulosta hieman. Lukitusraudates-tissä niiden vaikutus ei keskiarvoituksen vuoksi ole yleensä ollut merkittävä. Mittausten uusiminen tai syöttöjännitteen säätäminen kesken testin ei enää kuitenkaan onnistu uudella, ilman lukitusrauta suoritettavalla testausmenetelmällä, sillä moottorin pyörimisnopeus ehtii kiihtyä ja sähköiset arvot muuttua.

Jos mittaus halutaan toistaa, täytyy syöttöjännite katkaista ja käynnistää moottori uudelleen, kun moottori on pysähtynyt. Moottorin saattaa pyöriä melko pitkään jännitesyötön katkaisemisen jälkeen, joten mittauksen toistaminen vie turhaan ylimääräistä aikaa. Tästä syystä automaation ja MotTestin toimivuus sekä mittausajakohdan määrittäminen on tärkeää. Tällä hetkellä, vanha MotTest hyväksyy mittauksen, mikäli syöttöjännite eroaa enintään 3 prosenttia suunnittelun laskemasta tarkastusarvosta.

MotTestin uusi versio valitsee tällä hetkellä yhden mittauspisteen siten, että pääjännite on mahdollisimman lähellä suunnittelun laskemaa tarkastusarvoa. Mittaustulosten jonkinlainen keskiarvoistaminen tai suodatus voisi olla paikallaan, jotta mahdolliset heilahtelut jännitteessä ja virrassa eivät heijastuisi yhtä voimakkaasti lopulliseen mittaustulokseen. Kuten aiemmista oikosulkuvirran kuvaajista (ks. esim. kuva 27) nähdään, tehollisvirta vaihtelee oikosulkutestissä jonkin verran ja esimerkiksi päävirtojen poikkeama voi olla erisuuruinen eri ajanhetkillä. Hiltusen ja muiden (2011, s. 79) mukaan näyte sisältää aina epävarmuuden siitä, kuinka hyvin se edustaa tutkittavaa kokonaisuutta. MotTest-mittausohjelmiston algoritmia kehitettäessä on otettava huomioon, etteivät jännitteessä tai virrassa mahdollisesti esiintyvät epätavalliset heilahtelut jää huomaamatta.

Taulukossa 9 vertaillaan ilman lukitusrautaa suoritettujen oikosulkutestien tuloksia, jotka on muodostettu yksittäisen mittaustuloksen perusteella. Tässä diplomityössä yksittäiset mittausnäytteet on valittu Excel-tilukkolaskentaohjelmaan kerättyjen mittausnäytteiden joukosta MotTestin algoritmin sääntöjen mukaisesti. MotTestin algoritmi toimii diplomityön tekohetkellä siten, että mittauksesta rajataan aikaväli $t = 0-0,5$ s pois, jonka jälkeen MotTest valitsee sen mittausnäytteen, jonka jännite on lähimpänä suunnittelun määrittämiä laskennallista syöttöjännitettä.

Taulukko 9. Mittaustulosten vertailu, kun mitataan ilman lukitusrautaa, yksittäinen mittausnäyte.

	2-napainen testimoottori		6-napainen testimoottori	
	Ehjä moottori	Yksi viallinen roottorisauva	Ehjä moottori	Yksi viallinen roottorisauva
$\Delta I_{km\%}$	1,47	1,03	4,96	6,11
$\Delta P_{km\%}$	9,38	7,37	11,80	12,82
Päävirtojen epäsymmetria %	0,38	0,19	0,06	0,58

Mitatun oikosulkuvirran ja virran odotusarvon välinen poikkeama $\Delta I_{km\%}$ lasketaan yhtälön 4 mukaisesti, ja mitatun oikosulkutehon ja tehon odotusarvon välinen poikkeama lasketaan yhtälön 6 mukaisesti. Virran ja tehon odotusarvot lasketaan yhtälöiden 3 ja 5 mukaan. Päävirtojen epäsymmetrian vertailuarvo muodostetaan laskemalla päävirran, joka poikkeaa keskiarvosta eniten, ja päävirtojen keskiarvon suhde. Suhdeluku kerrotaan prosenttiluvulla 100 %. Vertailuarvoina käytetään lukujen itseisarvoja.

Taulukossa 10 vertaillaan mittaustuloksia, jotka on muodostettu aikavälillä $t = 0,5\text{--}2$ s kerätyistä mittausnäytteistä. Keskiarvoistusaika on siis 1,5 sekuntia. Mittausnäytteiden keskiarvo lasketaan Excel-tilukkolaskentaohjelmalla. Mitatun virran ja virran odotusarvon väliset poikkeamat $\Delta I_{km\%}$ ovat suurempia yksittäisen mittausnäytteen perusteella muodostetuissa mittaustuloksissa. Tulokset ovat kuitenkin samansuuntaisia myös 1,5 sekunnin keskiarvoistusajalla.

Taulukko 10. Mittaustulosten vertailu, kun mitataan ilman lukitusrautaa, $t = 0,5-2$ s.

	2-napainen testimoottori		6-napainen testimoottori	
	Ehjä moottori	Yksi viallinen roottorisauva	Ehjä moottori	Yksi viallinen roottorisauva
$\Delta I_{km\%}$	1,29	0,84	3,80	4,76
$\Delta P_{km\%}$	9,01	7,18	10,48	11,90
Päävirtojen epäsymmetria %	0,29	0,34	0,16	0,07

Taulukossa 11 verrataan mittaustuloksia, jotka on muodostettu keskiarvoistamalla aikavälillä $t = 0,5-3,5$ s kerätyt mittaustulokset. Keskiarvoitusaika on siis 3 sekuntia. Oikosulkuvirran poikkeaman vertailuarvo $\Delta I_{km\%}$ sekä oikosulkutehon vertailuarvo $\Delta P_{km\%}$ ovat hieman suurempia kuin 1,5 sekunnin keskiarvoistujalla. Päävirtojen epäsymmetriaa kuvaavat prosenttiluvut ovat pienempiä 3 sekunnin keskiarvoistujalla.

Taulukko 11. Mittaustulosten vertailu, kun mitataan ilman lukitusrautaa, $t = 0,5-3,5$ s.

	2-napainen testimoottori		6-napainen testimoottori	
	Ehjä moottori	Yksi viallinen roottorisauva	Ehjä moottori	Yksi viallinen roottorisauva
$\Delta I_{km\%}$	1,34	0,95	4,40	5,42
$\Delta P_{km\%}$	9,18	7,34	11,19	12,26
Päävirtojen epäsymmetria %	0,25	0,32	0,14	0,06

Nykyisessä MotTest-versiossa mitatun oikosulkuvirran ja virran odotusarvon välinen poikkeama $\Delta I_{km\%}$ saa olla enimmillään 15 prosenttia, ja mitatun oikosulkutehon ja tehon odotusarvon välisen poikkeaman yläraja on 30 prosenttia. Päävirtojen epäsymmetrian vertailuarvo saa olla enintään 5 prosenttia. Taulukoiden 9, 10 ja 11 tuloksista huomataan, että vertailuarvot ovat toleranssirajoissa eli tulokset ovat hyväksyttävissä. Rikkinäinen roottorisauva ei siis aiheuta tunnistettavia eroja vertailuarvoihin. 2-napaisella testimoottorilla oikosulkuvirran ja -tehon poikkeamat odotusarvoista ovat suuremmat

ehjällä moottorilla, mutta 6-napaisella testimoottorilla arvot ovat puolestaan pienemmät.

Pohtimisen arvoista on, onko mittausnäytteiden keskiarvoistaminen ideaali tapa muodostaa mittaustuloksia vai olisiko tarkoituksenmukaisempaa käyttää esimerkiksi mediaania tai jonkinlaista suodatusalgoritmia. Mediaani tarkoittaa keskilukua, joka ilmoittaa jakauman keskimmäisen arvon, kun jakauma on lajiteltu suuruusjärjestykseen (Tilastokeskus, n.d.). Keskiarvoa käytettäessä hetkelliset jännite- tai virtamuutokset voivat vääristää mittaustulosta, mutta mediaania käyttämällä voidaan mahdollisesti vähentää niiden vaikutusta lopulliseen mittaustulokseen.

Keskiarvon laskeminen on perusteltua lukitusraudalla suoritettussa testissä sekä esimerkiksi tyyppitestin tehonmittauksissa, sillä moottori on pysyvässä tilassa eli pyörimisnopeus on nolla tai moottori pyörii tasaisella pyörimisnopeudella. Pysyvässä tilassa keskiarvoistusaika voi olla pidempi, jolloin yksittäiset heilahdukset sähköisissä arvoissa eivät vaikuta lopulliseen mittaustulokseen yhtä paljon. Ilman lukitusrautaa tehtävässä oikosulkutestissä mittaukset suoritetaan moottorin muutostilassa, joten tarkasteltava joukko eli mittausnäytteet eivät välttämättä edusta samankaltaista tilannetta, jos pyörimisnopeus ehtii kiihtyä ja virta laskea tarkastelujakson aikana. Jos keskiarvoistusta suoritetaan, on keskiarvoistusajan sopivan pituuden määrittäminen tärkeää.

Yhtenä vaihtoehtona voidaan myös pitää sitä, että MotTest-ohjelma tarkastelisi muita mittausnäytteitä, jotka esiintyvät ennen ja jälkeen valitun mittausnäytteen, ja vertaisi arvoja keskenään. Varsinaista keskiarvoistusta ei tällöin suoritettaisi, mutta voitaisiin tarkistaa, ettei valittu mittanäyte eroa muista näytteistä merkittävästi. Tällöin ohjelmalle täytyisi määrittää jokin raja-arvo, jolloin mittausnäyte eroaa muista näytteistä tavanomaista enemmän. Tällä tavalla voidaan rajata pois tapaukset, joissa MotTestin valitsema, tarkastusarvoa lähinnä oleva arvo esiintyisi esimerkiksi hetkellisessä huippukohdassa tai kun sähköisissä arvoissa esiintyy poikkeavan suurta heiluntaa.

9.3 Rikkinäisen roottorisauvan vaikutus mittaustuloksiin

Yksi rikkinäinen roottorisauva ei näkynyt edellä esitetyissä mittaustuloksissa tunnistettavasti. 2-napaisen moottorin roottorissa on 40 sauvaa, ja 6-napaisella moottorilla on 56 roottorisauvaa. Asad ja muut (2020, s. 1482) esittävät, että vian aiheuttaman modulaatioindeksin M suuruuteen vaikuttaa vian vakavuus eli rikkinäisten roottorisauvojen N_b ja roottorisauvojen kokonaismäärän N_t suhde (yhtälö 9). Yksittäisen roottorisauvan vika aiheuttaa melko pienen modulaatioindeksin ja -signaalin, jota on vaikeaa huomata nykyisillä mittalaitteilla tai perinteisillä FFT-menetelmillä. Bellinin ja muiden (2008, s. 4113) mukaan rikkinäiset roottorisauvat aiheuttavat staattorivirtaan yleensä vain muutaman prosentin vaihtelua, vaikka roottorissa virtaerot olisivat suuremmat. Tämä osaltaan myös vaikeuttaa vikojen tunnistamista.

Huomionarvoista on myös todeta, ettei yksittäisen roottorisauvan vikaa huomattu myöskään vanhalla lukitusraudamenetelmällä. Tämä tarkoittaa, että tärkeää informaatiota ei menetetä ja uuden menetelmän käyttöönotto on mahdollista. Mikäli roottorisauvan vika olisi näkynyt vanhalla testausmenetelmällä, mutta ei ilman lukitusraudaa, olisi lukitusraudan käyttö jatkossakin perusteltua. Yksittäisen mittaustuloksen perusteella muodostetut mittaustulokset olivat lähimpänä vanhan lukitusraudalla tehtävän testausmenetelmän mukaisia mittaustuloksia (vrt. taulukot 6 ja 9).

Oikosulkutestejä tehtäessä pohdintaa aiheuttaa myös vikojen yleisyys, sillä koestajien mukaan vikoja ei tule vastaan kovinkaan usein. Kirjallisuudessa roottorivikoja on tutkittu paljon ja vikoja pidetään yleisesti merkittävinä. J. Ikäheimo (henkilökohtainen keskustelu, 5.4.2023) pohti, että roottorisauvojen viat ovat mahdollisesti voineet olla yleisempiä aiemmin, kun roottorisauvat kiinnitettiin oikosulkurenkaiseen juottamalla. Juottaminen tarkoittaa metallien liittämistä toisiinsa juotteella eli metallilla tai metalliseoksella, joka sulatetaan. Nykyään roottorisauvat valetaan roottorin uriin, mikä vaikuttaa olevan kestävämpi tapa (J. Ikäheimo, henkilökohtainen keskustelu 5.4.2023). Valaminen on

valmistusmenetelmä, jossa valmistusmateriaali sulatetaan ja kaadetaan tai puristetaan muottiin.

Hassanin ja muiden mukaan (2018, s. 895) yleisiä rasitteita moottorille ovat käynnistys- ja ylikuormatestien aiheuttama ylikuumeneminen ja lämpöjännitys, jotka voivat johtaa vikoihin. Myös muut käytöstä aiheutuvat rasitteet, kuten jännitteen tai akselin vääntömomentin vaihtelut rasittavat roottoria (Hassan ja muut, 2018, s. 895). Käytöstä aiheutuvat ja ilmenevät viat voivat mahdollisesti olla yleisempiä kuin uusien moottoreiden valmistuksessa esiintyvät viat. Roottoriviat voivat aiheuttaa sekundäärisiä vikoja, eli esimerkiksi muiden osien ennen aikaista vikaantumista (Garcia-Perez ja muut, 2014, s. 3403; Thomson ja Fenger, 2001; s. 26). Tästä syystä on haastavaa arvioida roottorivikojen ja mahdollisten rakenteellisten heikkouksien määrää ja merkitystä.

10 Johtopäätökset

Oikosulkutesti tehdään tuotantolinjalla jokaiselle oikosulkumoottorille osana rutiinitestiä, jotta voidaan varmistaa moottorin toiminta ja laatu. Oikosulkutesti tehdään perinteisesti siten, että roottorin pyöriminen estetään akselin lukitusraudalla, jolloin oikosulkumoottori vastaa toiminnaltaan muuntajaa, jonka toisio on oikosulussa. Tässä diplomityössä tutkitaan uudenlaista, ilman lukitusrautaa suoritettavaa oikosulkutestimenetelmää IEC LV Motors -yksikön Vaasan MM-tehtaan AL2A-rutiinitestipaikalla. Oikosulkutestistä saadaan selville testattavan moottorin oikosulkuvirta, -jännite, -teho ja -tehokerroin. Oikosulkutestejä suoritettiin kahdelle 315-runkokoon oikosulkumoottorille, jotka olivat 2- ja 6-napaisia. Mittauksia suoritettiin alennetulla jännitteellä ja 50 Hz:n syöttötaajuudella.

Tämän diplomityön tarkoituksena on antaa vastauksia ensimmäiseen tutkimuskysymykseen: miten oikosulkuvirta ja -jännite voidaan mitata ja laskea oikosulkumoottorilta, jonka akselia ei ole lukittu? Mittausten perusteella vastauksena voidaan todeta, että alennetulla jännitteellä ja ilman lukitusrautaa suoritettussa oikosulkutestissä saadaan samanlaisia tuloksia kuin lukitusraudalla tehtävässä oikosulkutestissä. Oikosulkutestin tulosten laskentaan ja vertailuun voidaan käyttää samoja yhtälöitä kuin aikaisemminkin testausmenetelmällä. On kuitenkin vielä pohdittava, mikä olisi paras menetelmä muodostaa mittaustulos.

Esitettyjen mittausten perusteella MotTestin algoritmin valitsema yksittäinen mittaustulosnäyte on toimiva tapa muodostaa mittaustulos. Algoritmia voisi kuitenkin mahdollisesti vielä kehittää tunnistamaan esimerkiksi ympäröivät huippu- ja minimiarvot, jotta voidaan varmistua, ettei mittaustulosta muodosteta hetkellisen poikkeaman kohdalla. MotTestin raja-arvoja voidaan tarpeen mukaan asettaa uudelleen, kun uudenlaisen testausmenetelmän mukaista mittaustulosta saadaan enemmän erikokoisilla ja -tyyppisillä oikosulkumoottoreilla.

Toinen tutkimuskysymys kuuluu: millaisia asioita täytyy huomioida mittausajankohdan ja mittausajan valinnassa? Mittausajankohdalla tarkoitetaan ajanhetkeä, jolloin mittaus suoritetaan ja mittausajalla tarkoitetaan mittauksen kestoa. Mittausajankohdan ja mittausajan valintaan vaikuttaa se, kuinka nopeasti testattava moottori käynnistyy ja pyörimisnopeus kiihtyy. Diplomityön mittaustuloksista huomataan, että syöttöjännitteen suuruus vaikuttaa testattavan moottorin staattorivirran muutosilmiön ajalliseen keston. Myös moottorin napaluku ja roottorin inertia vaikuttavat siihen, kuinka nopeasti moottorin pyörimisnopeus kiihtyy. Mittausajankohdan ja -aikavälin valinnassa täytyy huomioida toisaalta, että kytkentäsysäysilmiö rajataan tarkasteluvälin ulkopuolelle ja toisaalta että moottorin virta ei ehdi laskea liikaa.

Jatkossa voisi jatkaa tutkimuksia siitä, miten erikokoiset ja erityisesti tarkasteltuja pienemmät oikosulkumoottorit toimivat ilman lukitusrautaa suoritettussa oikosulkutestissä. Tätä diplomityötä varten suoritettujen mittausten perusteella voidaankin todeta, että pienet ja moninapaiset moottorit kiihtyvät nopeammin pysyvän tilan pyörimisnopeuteen, jolloin virran ja jännitteen muutosilmiöt ovat lyhyet. Lisäksi olisi mielenkiintoista tutkia, miten generaattorisyoöttö ja 60 Hz:n syöttötaajuus vaikuttavat ilman lukitusrautaa suoritettavan oikosulkutestin luotettavuuteen ja mittausajankohdan valintaan. Tässä diplomityössä keskityttiin rutiinitestipaikoilla tehtäviin oikosulkutesteihin, mutta koekentällä sähkönsyoöttö tulee generaattorilta ja rutiinistestijä suoritetaan myös 60 Hz:n syöttötaajuudella.

Kolmantena on tarkoitus antaa vastauksia tutkimuskysymykseen: voidaanko nykyisillä mittalaitteilla ja uudentyyppisellä, ilman lukitusrautaa suoritettavalla oikosulkutestillä huomata roottorivikoja? Tässä diplomityössä vikaa ei tunnistettu kummallakaan testausmenetelmällä eli lukitusraudalla tai ilman lukitusrautaa nykyisillä mittalaitteilla. Roottoriin aiheutettu vika oli kuitenkin hyvin pieni. Roottoriviat olisivat mielenkiintoinen jatkotutkimuskohde. Vikoja voisi mahdollisesti tutkia ensin simulointityökalulla, jotta osataan tarkemmin arvioida, kuinka suurta vaihtelua tai millaisia muutoksia vika aiheuttaisi staattorivirtaan. Myös erityyppisiä roottorivikoja, kuten epäkeskisyyttä voisi tutkia.

Huomioitavaa on kuitenkin myös se, että staattorivirtaan voivat vaikuttaa useat muutkin asiat kuin moottorin tila. Muun muassa sähköverkossa ja sähkönsyötössä esiintyvät vaihtelut vaikuttavat mitattuun virtaan, mikä hankaloittaa esimerkiksi virran aaltomuodon arviointia.

Lähteet

- ABB oy. (2001). *Sähkökäytön mitoitus*. Tekninen opas nro 7. Noudettu 6.3.2023 osoitteesta https://library.e.abb.com/public/b11dafe92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf
- ABB oy. (2022a). *Low voltage motors for explosive gas atmospheres*. Tuoteluettelo. Noudettu 3.3.2023 osoitteesta <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107192&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- ABB oy. (2022b). *Low voltage process performance motors 400 V 50 Hz, 460 V 60 Hz*. Tuoteluettelo. Noudettu 3.3.2023 osoitteesta <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- Asad, B., Vaimann, T., Belahcen, A., Kallaste, A., Rassölkin, A. & Heidari, H. (2020). The Low Voltage Start-up Test of Induction Motor for the Detection of Broken Bars. *International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, Göteborg, Ruotsi, 23.–26.8.2020. 1481–1487. <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9271018>
- Bellini, A., Filippetti, F., Franceschini, G., Tassoni, C. & Kliman, G. B. (2001). Quantitative Evaluation of Induction Motor Broken Bars by Means of Electrical Signature Analysis. *Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*, vsk(37) n:o 5, 1248–1255. <https://doi.org/10.1109/28.952499>
- Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni, C. & Capolino, G-A. (2008). Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vsk(55) n:o 12, 4109–4126. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.2007527>
- Fluke. (n.d.). *80i-1000s Clamp-on AC Current Probe 100mA to 1000A*. Tekninen tiedote. Noudettu 11.4.2023 osoitteesta <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/FLUKE-80I-1000S-Datasheet.pdf>
- Fluke. (2007). *Norma 4000/5000 Power Analyzer*. Manuaali. Noudettu 8.11.2022 osoitteesta https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/norma_omeng0200.pdf
- Fluke. (2023a). *i410 AC/DC-virtapihti*. Tekninen tiedote. Noudettu 23.2.2023 osoitteesta <https://www.fluke.com/fi-fi/product/accessories/current-clamps/fluke-i410/ds>

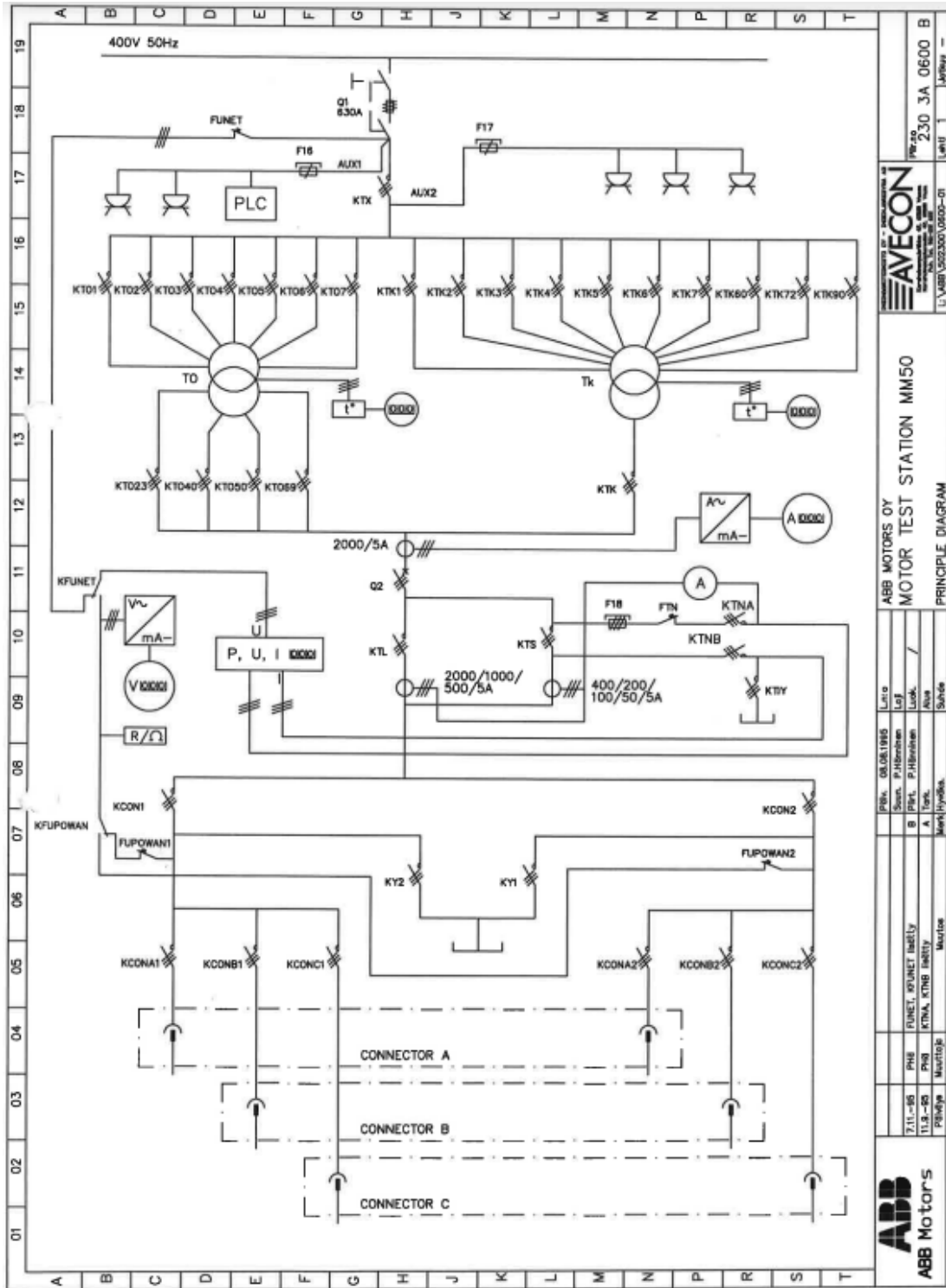
- Fluke. (2023b). *Fluke i1000s AC Current Probe*. Tekninen tiedote. Noudettu 15.3.2023 osoitteesta <https://www.fluke.com/en-us/product/accessories/probes/fluke-i1000s/ds>
- Garcia-Perez, A., Ibarra-Manzano, O. & Romero-Troncoso, R. J. (2014). Analysis of partially broken rotor bar by using a novel empirical mode decomposition method. *IECON 2014 - 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Dallas, USA, 29.10.-1.11.2014. 3403–3408.
<https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7049002>
- Hakoniemi, A. (3.5.2018). *Ohje moottorin rutiinikoestusarvojen laskentaan*. FIMOT1803. Ohjedokumentti. ABB oy. 1–5.
- Hassan, O. E., Amer, M. Abdelsalam, A. K. & Williams, B. W. (2018). Induction motor broken rotor bar fault detection techniques based on fault signature analysis – a review. *IET Electric Power Applications*, vsk(12) n:o 7, 895–907.
<https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.0054>
- Hauru, A. & Pantti, T. (20.9.2010). *Routine Test program MotTest 2.2 – Formulas*. 3GZF500930-922. Tekninen asiakirja. ABB oy.
- Hiltunen, E., Linko, L., Hemminki, S., Hägg, M., Järvenpää, E., Saarinen, P., Simonen, S. & Kärhä, P. (2011). *Laadukkaan mittauksen perusteet*. Metrologian neuvottelukunta ja Mittatekniikan keskus, Mikes. Noudettu 22.2.2023 osoitteesta <https://publications.vtt.fi/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>
- International Electrotechnical Commission IEC. (1996a). *Load (of a machine)*. Electropedia. IEV ref 411-51-01. Noudettu 6.3.2023 osoitteesta <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=411-51-01>
- International Electrotechnical Commission IEC. (1996b). *No-load (operation)*. Electropedia. IEV ref 411-51-02. Noudettu 6.3.2023 osoitteesta <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=411-51-02>
- International Electrotechnical Commission IEC. (1996c). *Locked-rotor current*. Electropedia. IEV ref 411-48-16. Noudettu 9.3.2023 osoitteesta <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=411-48-16>

- International Electrotechnical Commission IEC. (2013). *Transient behaviour*. Electropedia. IEV ref 351-45-08. Noudettu 27.5.2023 osoitteesta <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=351-45-08>
- International Electrotechnical Commission IEC. (2014). *Rotating electrical machines – Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)* (IEC 60034-2-1).
- International Electrotechnical Commission IEC. (2017a). *Rotating electrical machines – Part 1: Rating and performance* (IEC 60034-1).
- International Electrotechnical Commission IEC. (2017b). *Modulation index*. Electropedia. IEV ref 702-06-50. Noudettu 27.5.2023 osoitteesta <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=702-06-50>
- Karami, F. Poshtan, J. & Poshtan, M. (2010). Broken bar fault detection in Induction Motors Based on modified Winding Function. *2010 IEEE International Conference on Control Applications*, Yokohama, Japan, 8.-10.9.2010. 1951–1956. <https://doi.org/10.1109/CCA.2010.5611213>
- Ketoluoto, H. (18.9.2009). *Testausasemien AL1A, AL1B, AL2A, AL2B ja AL3B käyttöohje*. FIMOT1496. Ohjedokumentti. ABB oy. 1–29.
- LeCroy. (2006). *WaveSurfer Xs Series*. Tekninen tiedote. Noudettu 11.4.2023 osoitteesta <https://www.testequipmenthq.com/datasheets/LECROY-WAVESUR-FER%2044XS-Datasheet.pdf>
- Lee, S. B, Shin, J., Park, Y., Kim, H. & Kim, J. (2021). Reliable Flux-Based Detection of Induction Motor Rotor Faults From the Fifth Rotor Rotational Frequency Sideband. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vsk(68) n:o 9, 7874–7883. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3016241>
- McElveen, R. & Melfi, M. (2016). Locked-Rotor Test Methods for Induction Motors Investigated. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vsk(52) n:o 4, 3595–3602. <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2544925>
- Pantti, T. (21.1.2021). *Mittalaitteiden valinnat ja asettelut*. FIMOT11425. Ohjedokumentti. ABB oy. 1–4.

- Similä, I. (2.6.2022). *Rutiinikoestusohje induktiomootoreille ja -generaattoreille*. FIMOT0068. Ohjedokumentti. ABB oy. 1–12.
- Ryynänen, J. (24.8.2017). *ELEC-C3230 Elektroniikka 1 – Luento 2: Lineaariset vahvistinmallit ja vahvistusmääritelmät* [luentomateriaali]. Aalto-yliopisto. Noudettu 17.4.2023 osoitteesta https://mycourses.aalto.fi/plu-ginfile.php/967858/mod_resource/content/10/ELEC-C3230_L2.pdf
- Tavner, P., Ran, L., Penman, J. & Sedding, H. (2008). *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. IET Power and Energy Series 56. 1–282.
- Tektronix. (2012). *12 Things to Consider When Choosing an Oscilloscope*. Noudettu 22.2.2023 osoitteesta https://www.mouser.com/pdfdocs/Tektronix12_things_to_consider1.pdf
- Tektronix. (2022). *4 Series MSO – Mixed Signal Oscilloscope Datasheet*. Tekninen tiedote. Noudettu 22.2.2023 osoitteesta <https://download.tek.com/datasheet/MSO4-Datasheet-EN-US-48W-61558-13.pdf>
- Tektronix. (2023). *High-voltage Differential Probes TMDP0200 - THDP0200 - THDP0100 - P5200A - P5202A - P5205A - P5210A*. Tekninen tiedote. Noudettu 23.2.2023 osoitteesta <https://download.tek.com/datasheet/TMDP-P5200Datasheet-51W1119515.pdf>
- Teledyne LeCroy. (2012). *HDO6000 High Definition Oscilloscopes 350 MHz – 1 GHz*. Tekninen tiedote. Noudettu 2.3.2023 osoitteesta <https://www.testequip-menthq.com/datasheets/LECROY-HDO6054-Datasheet.pdf>
- Thomson, W. T. & Fenger, M. (2001). Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*, vsk(7) n:o 4, 26–34. <https://doi.org/10.1109/2943.930988>
- Tilastokeskus. (n.d.). *Mediaani*. Käsiteluettelo. Noudettu 18.4.2023 osoitteesta <https://www.stat.fi/meta/kas/mediaani.html>
- Verkkonen, V. (2017). *Sähkömoottorikäytöt – 2 Epätahtikoneet* [luentomateriaali]. Vaasan ammattikorkeakoulu. Julkaisematon.

Liitteet

Liite 1. Testauskeskuksen AL2A periaatekaavio.



Kuva 36. Testauskeskuksen AL2A periaatekaavio.

Liite 2. Tektronix 4 Series MSO44 -oskilloskoopin tekniset tiedot.

Model overview

Oscilloscope

	MSO44	MSO46
FlexChannel inputs	4	6
Maximum analog channels	4	6
Maximum digital channels (with optional logic probes)	32	48
Auxiliary Trigger Input	≤300 V _{RMS} (Edge Trigger only)	
Bandwidth (calculated rise time)	200 MHz, 350 MHz, 500 MHz, 1 GHz, 1.5 GHz	
DC Gain Accuracy	50 Ω: ±1%, (±2.5% at 1 mV/Div and 500 μV/Div settings), de-rated at 0.100%/°C above 30 °C 1 MΩ and 250 kΩ: ±1.0%, (±2.0% at 1 mV/Div and 500 μV/Div settings)	
ADC Resolution	12 bits	
Vertical Resolution	8 bits @ 6.25 GS/s 12 bits @ 3.125 GS/s 13 bits @ 1.25 GS/s (High Res) 14 bits @ 625 MS/s (High Res) 15 bits @ 312.5 MS/s (High Res) 16 bits @ ≤125 MS/s (High Res)	
Sample Rate	6.25 GS/s on all analog / digital channels (160 ps resolution)	
Record Length (std.)	31.25 Mpoints on all analog / digital channels	
Record Length (opt.)	62.5 Mpoints on all analog / digital channels	
Waveform Capture Rate, typical	>500,000 wfms/s	
Arbitrary/Function Generator (opt.)	13 predefined waveform types with up to 50 MHz output	
DVM	4-digit DVM (free with product registration)	
Trigger Frequency Counter	8-digit frequency counter (free with product registration)	

Kuva 37. Tektronix 4 Series MSO44 -oskilloskoopin tekniset tiedot (Tektronix, 2022, s. 28).

Liite 3. Fluke i410 AC/DC -virtapihdin tekniset tiedot.

Tekniset tiedot	
Mittausanturi	Hall-anturi
Mittausalue	400 A, AC/DC
Jatkuvan virran mittausalue	1 A - 400 A AC/DC
Suurin ei-tuhoava virta	400 A
Pienin mitattava virta	0,5 A
Perustarkkuus	3,5% + 0,5 A (%-lukemasta+viimeistä numeroa)
Käyttökelpoinen taajuusalue	DC - 3 kHz
Ulostulosignaali	1 mV/A
Nollapisteen säätö	Kyllä
Turvallisuussuunnittelu	
Turvallisuus	CAT III, 600 V
Suurin jännite	600 V
Mekaaniset ja yleiset tiedot	
Takuu	1 vuoden
Paristojen käyttöikä	9 V, 60 h
Johtimen enimmäishalkaisija	30 mm 2 x 25 mm
Liitäntäkaapelin pituus	1,6 m
Turvamalliset banaanipistokkeet	Kyllä

Kuva 38. Fluke i410 AC/DC -virtapihdin tekniset tiedot (Fluke, 2023a, s. 1–2).

Liite 4. Teledyne LeCroy HDO6054 -oskilloskoopin tekniset tiedot.

	HDO6034 HDO6034-MS	HDO6054 HDO6054-MS	HDO6104 HDO6104-MS
Analog - Vertical			
Bandwidth @ 50 Ω (-3 dB)	350 MHz	500 MHz	1 GHz
Rise Time (10–90%, 50 Ω)	1 ns typical	700 ps typical	450 ps typical
Input Channels	4		
Vertical Resolution	12-bits; up to 15-bits with enhanced resolution (ERES)		
Sensitivity	50 Ω : 1 mV/div–1 V/div, fully variable 1 M Ω : 1 mV/div–10 V/div, fully variable		
DC Gain Accuracy (Gain Component of DC Accuracy)	$\pm(0.5\%)$ F.S, offset at 0 V		
Bandwidth Limiters	20 MHz, 200 MHz		
Maximum Input Voltage	50 Ω : 5 Vrms, 1 M Ω : 400 V max (DC + Peak AC \leq 10 KHz)		
Input Coupling	50 Ω : DC, GND; 1 M Ω : AC, DC, GND;		
Input Impedance	50 Ω \pm 2.0%; 1 M Ω \pm 2.0% 15 pF		
Offset Range	50 Ω : 1 mV - 4.95 mV: \pm 1.6 V, 5 mV - 9.9 mV: \pm 4 V, 10 mV - 19.8 mV: \pm 8 V, 20 mV - 1 V: \pm 10 V 1 M Ω : 1 mV - 4.95 mV: \pm 1.6 V, 5 mV - 9.9 mV: \pm 4 V, 10 mV - 19.8 mV: \pm 8 V, 20 mV - 100 mV: \pm 16 V, 102 mV - 198 mV: \pm 80V, 200 mV - 1 V: \pm 160 V, 1.02 V - 10 V: \pm 400 V		
DC Vertical Offset Accuracy	$\pm(1.0\%$ of offset value + 0.5%FS + 0.02% of max offset + 1mV)		
Analog - Acquisition			
Sample Rate (Single-shot)	2.5 GS/s		
Sample Rate (Repetitive)	125 GS/s, user selectable for repetitive signals (20 ps/div to 10 ns/div)		
Record Length	Standard -STD: 50 Mpts/ch (all channels) Option -L: 100 Mpts/ch (all channels) Option -XL: 250 Mpts/ch (all channels)		
Acquisition Modes	Real-time, Roll, RIS (Random Interleaved Sampling), Sequence (Segmented Memory up to 30,000 segments, 60,000 segments -L Option, 65,000 -XL option) with 1us intersegment dead-time		
Timebase Range	20 ps/div - 5 ks/div with standard memory (up to 10 ks/div with -L memory, 25 ks/div with -XL memory); RIS available at \leq 10 ns/div; Roll Mode available at \leq 100 ms/div and \leq 5 MS/s		
Timebase Accuracy	\pm 2.5 ppm for 5 to 40°C + 1.0ppm/year from calibration		
Channel-Channel Deskew Range	\pm 9 x time/div, setting 100 ms max., each channel		
External Timebase Reference (Input)	10 MHz \pm 25 ppm at 0 to 10 dBm into 50 Ω		
External Timebase Reference (Output)	10 MHz 20 dBm \pm 1 dBm, sinewave synchronous to scope timebase		
External Clock	DC to 100 MHz (50 Ω /1 M Ω). Ext. BNC input, Minimum rise time and amplitude requirements apply at low frequencies		
Analog - Acquisition Processing			
Averaging	Summed averaging to 1 million sweeps; continuous averaging to 1 million sweeps		
Enhanced Resolution (ERES)	From 12.5- to 15-bits vertical resolution		
Envelope (Extrema)	Envelope, floor, or roof for up to 1 million sweeps		
Interpolation	Linear (Default) or Sin x/X		
Digital - Vertical and Acquisition (-MS Models Only)			
Input Channels	16 Digital Channels		
Threshold Groupings	Pod 2: D15 - D8, Pod 1: D7 - D0		
Threshold Selections	TTL, ECL, CMOS (2.5 V, 3.3 V, 5 V), PECL, LVDS or User Defined		
Maximum Input Voltage	\pm 30V Peak		
Threshold Accuracy	$\pm(3\%$ of threshold setting + 100mV)		
Input Dynamic Range	\pm 20V		
Minimum Input Voltage Swing	400mV		
Input Impedance (Flying Leads)	100 k Ω 5 pF		
Maximum Input Frequency	250 MHz		
Sample Rate	1.25 GS/s		
Record Length	Standard -STD: 50 MS - 16 Channels Optional -L: 100 MS - 16 Channels Optional -XL: 125 MS - 16 Channels		
Minimum Detectable Pulse Width	2 ns		
Channel-to-Channel Skew	350 ps		
User Defined Threshold Range	\pm 10 V in 20 mV steps		
User Defined Hysteresis Range	100 mV to 1.4 V in 100 mV steps		

Kuva 39. Teledyne LeCroy HDO6054 -oskilloskoopin tekniset tiedot (Teledyne LeCroy, 2012, s. 15).

Liite 5. LeCroy WaveSurfer 44Xs -oskilloskoopin tekniset tiedot.

	WaveSurfer 44Xs	WaveSurfer 42Xs	WaveSurfer 64Xs	WaveSurfer 62Xs
Bandwidth (at probe tip)	400 MHz	400 MHz	600 MHz	600 MHz
Rise Time	875 ps	875 ps	625 ps	625 ps
Input Channels	4	2	4	2
Display	10.4" Color flat-panel TFT-LCD, 800 x 600 SVGA, touch screen			
Sample Rate (single-shot)	2.5 GS/s (all channels)			
Sample Rate (RIS mode)	50 GS/s			
Standard Record Length	2.5 Mpts/Ch (all channels)			
Standard Capture Time	up to 1 ms at full sample rate			
Vertical Resolution	8 bits			
Vertical Sensitivity	2 mV/div–10 V/div (1 M Ω); 2 mV/div–1 V/div (50 Ω)			
Vertical (DC Gain) Accuracy	$\pm 1.0\%$ of full scale (typical); $\pm 1.5\%$ of full scale, ≥ 10 mV/div (warranted)			
BW Limit	20 MHz, 200 MHz			
Maximum Input Voltage	CAT I: 400 V max. (DC + Peak AC ≤ 5 kHz) with 1 M Ω input, 5 V _{rms} with 50 Ω input			
Input Coupling	AC, DC, GND (DC and GND for 50 Ω)			
Input Impedance	1 M Ω 16 pF, or 50 Ω $\pm 1\%$			
Probing System	BNC or ProBus			
Probes	One PP009 (5 mm) per channel (standard)			
Timebase Range	200 ps/div–1000 s/div (roll mode from 500 ms/div–1000 s/div)			
Timebase Accuracy	10 ppm			
Triggering				
Standard	Edge, Glitch, Width, Logic (Pattern), TV-Composite Video			
Advanced (WS Xs-ADVTRIG)	Runt, Slew Rate, Interval, Dropout, Qualified (State or Edge)			
Measure, Zoom, and Math Tools				
Standard Parameter Measurement	Up to 6 of the following parameters can be calculated at one time on any waveform: Amplitude, Area, Base (Low), Cyclic Area, Cyclic Mean, Cyclic RMS, Cyclic Std. Deviation, Delay, Duty, Fall Time (90%–10%), Fall Time (80%–20%), Frequency, Maximum, Mean, Minimum, Overshoot+, Overshoot-, Period, Peak-Peak, Phase, Rise Time (10%–90%), Rise Time (20%–80%), RMS, Skew, Standard Deviation, Top (High), Width+, Width-. Measurements can be gated.			
Zooming	Use front panel QuickZoom button, or use touch screen or mouse to draw a box around the zoom area.			
Standard Math	Operators include Sum, Difference, Product, Ratio, and FFT (up to 25 kpts with power spectrum output and rectangular, VonHann, and FlatTop windows). 1 math function may be defined at a time.			
Extended Math (WS Xs-MathSurf)	Adds the following additional math functions: Absolute Value, Averaging (summed and continuous), Derivative, Envelope, Enhanced Resolution (to 11 bits), Floor, Integral, Invert, Reciprocal, Roof, Square, and Square Root. Also adds chaining of two math functions, rescaling to different units, and 1 Mpts FFTs.			

Kuva 40. LeCroy WaveSurfer 44Xs -oskilloskoopin tekniset tiedot (LeCroy, 2006, s. 9).

Liite 6. Fluke i1000s -virtapihdin tekniset tiedot.

Specifications	
Nominal current range	10 A 100 A 1000 A
Continuous current range	0.1 A - 10 A 0.1 A - 100 A 1 A - 1000 A
Maximum non-destructive current	2000 A
Lowest measureable current	0.1
Basic accuracy	1% + 1 A (48-65 Hz) (% reading + floorspec)
Useable frequency	5 Hz - 100 kHz
Output level(s)	100 mv/A 10 mv/A 1 mv/A
Safety Specifications	
Safety	CAT III, 600 V CAT IV, 300V
Maximum voltage	600 V AC
Mechanical and General Specifications	
Warranty	1 year
Maximum conductor diameter	54 mm
Output cable length	1.6 m
BNC adapter	Yes

Kuva 41. Fluke i1000s -virtapihdin tekniset tiedot (Fluke, 2023b, s. 1–2).

Liite 7. Fluke 80i-1000s -virtapihdin tekniset tiedot.

Usable Freq. Range (with Current Derating): 5 Hz..100 kHz

Required Instrument Input Impedance: > 1 Mohm // =<47 pF

Maximum Conductor Size: 54 mm (2.13")

Working Voltage: Clamp jaws to ground 600V rms. CAT III per IEC 1010-02-032

Float Voltage: Output cable and connector to ground circuits 600Vrms CAT III per IEC 1010-02-032

Output Scaling	1 mV/A	10 mV/A	100 mV/A
Input current	5 to 1000A, (2000 peak)	0.5 to 100A, (200A peak)	0.1 to 10A, (20A peak)
Accuracy	5 to 1000A 2% of reading,	0.5 to 100A 2% of reading,	0.1 to 10A 3% of reading ± 100 mA

Kuva 42. Fluke 80i-1000s -virtapihdin tekniset tiedot (Fluke, n.d, s. 2).