



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Arttu Lehtinen

Kestomagneettimoottorin vikojen diagnosointi testitulosten perusteella

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

Vaasa 2023

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Arttu Lehtinen		
Tutkielman nimi:	Kestomagneettimoottorin vikojen diagnosointi testitulosten perusteella		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Sähkötekniikka		
Työn valvoja:	Timo Vekara		
Työn ohjaaja:	Tero Käsäkangas		
Työn tarkastaja:	Henrik Tarkkanen		
Valmistumisvuosi:	2023	Sivumäärä:	130

TIIVISTELMÄ:

Viime vuosina kestomagneettimoottoreiden käyttö on yleistynyt. Kestomagneettimoottoreilla on yleisesti ottaen korkea hyötysuhde ja alhainen hinta suhteessa esimerkiksi oikosulkumoottoreihin. Kestomagneettimoottorien käytön lisääntyminen on lisännyt haasteita moottorien testaamiseen ja koestukseen. Kestomagneettimoottorin rakenne on muista poikkeava, joten kyseisellä moottorilla voi olla vikoja, joita muissa tyypeissä ei ole. Sähkömoottorien testaukseen on olemassa standardit, ja sen lisäksi monilla yrityksillä on omia lisätestejään.

Tämä diplomityö on tehty ABB oy:lle. ABB oy:n IEC LV Motors -yksikön tuotekehitysosastolla oli tarve lisätä ja uudistaa kestomagneettimoottoreihin liittyvää dokumentaatiota. Työn tavoitteena oli päivittää ja modernisoida prosessia kestomagneettimoottorien vikojen löytämiseksi. Työ tehtiin käyttäen hyväksi kestomagneettimoottorin vikadiagnostiikkaan liittyvää tutkimuskirjallisuutta ja myös kohdeyrityksen sisäisiä materiaaleja hyödyntäen. Sen lisäksi erästä kestomagneettimoottoria testataan vikatilanteissa.

Työssä syvennytään aluksi kestomagneettimoottoreiden teoriaan. Tämän jälkeen tutustutaan erinäisiin kestomagneettimoottoreiden vikoihin. Sen jälkeen esitetään mittauspöytäkirja, joka saatiin testaamalla erästä kestomagneettimoottoria eri vikatilanteissa. Lopuksi esitellään mitaustulosten perusteella muodostettu vikapuuprosessi, jonka avulla koestajan on mahdollista toimia moottorin erinäisissä vikatilanteissa.

Ensimmäisenä tutkimuskysymyksenä oli selvittää kestomagneettimoottorien yleisimmät viat tutkimuskirjallisuuden perusteella. Toisena tutkimuskysymyksenä oli selvittää testit, joiden tulosten perusteella kestomagneettimoottorien yleisimmät viat voidaan selvittää kohdeyrityksessä. Kolmantena tutkimuskysymyksenä oli miettiä ja pohtia, miten ja kuinka paljon rutiinikoestuksen testausprotokollaa tulisi muuttaa. Joutuuko tietyissä tilanteissa tekemään lisätestejä poikkeavien koestustulosten perusteella.

Työn tuloksena luotiin vikapuuprosessi tuotannolle. Diplomityössä havaittiin, että osoitindigrammi on hyvä tapa etsittäessä eroja staattori- ja roottorivikojen välillä. Sen lisäksi havaittiin, että kytkentävioissa pelkästään roottorin pyörittäminen käsin voi olla tapa löytää kytkentävikkoja. Vikapuun avulla voidaan edetä ja tulkita mittauksia siten, että tiedetään, missä vika todennäköisimmin on ja mikä on toimenpide vian löytämisen jälkeen.

AVAINSANAT: kestomagneettimoottori, osoitindigrammi, vika, testitulos, vikapuuh

Sisällysluettelo

1 Johdanto	15
1 Kestomagneettimoottori	17
1.1 Kestomagneettimoottorin rakenne	18
1.1.1 Kestomagneettimoottorin staattori	19
1.1.2 Kestomagneettimoottorin roottori	21
1.2 Kestomagneettimoottorityypit	25
2 Kestomagneettimoottorin sähkömagneettiset viat	27
2.1 Sähköiset viat	30
2.2 Magneettiset viat	33
2.3 Mekaaniset viat ja muut valmistusprosessiin liittyvät viat	35
2.4 Vikojen selvittäminen	37
3 Vikatilanteiden mallintamisessa käytettävä kestopagneettimoottori	41
3.1 Mittalaitteet	46
3.2 Ehjä moottori tähtikytkennässä	48
3.3 Ehjä moottori kolmiokytkennässä	50
4 Kestomagneettimoottorin roottoriviat	55
4.1 Magneetti pois paikaltaan kolmio- ja tähtikytkennässä	55
4.2 Magneetti väärinpäin kolmiokytkennässä ja tähtikytkennässä	64
5 Kestomagneettimoottorin staattoriviat	70
5.1 Testi, jossa staattori on käämitty väärin kahden vaiheen välillä kolmiokytkennässä	71
5.2 Testi, jossa staattori on käämitty väärin kahden vaiheen välillä tähtikytkennässä	78
5.3 Käämiä viereisessä urassa kolmiokytkennässä	80
5.4 Käämiä viereisessä urassa tähtikytkennässä	86
6 Kestomagneettimoottorin vika kytkennöissä ja ilmapälissä	89
6.1 Ilmaraon kasvattaminen tähti- ja kolmiokytkennässä	89

6.2	KytKentävirhe terminaalissa tähtikytkennässä	95
6.3	KytKentävirhe terminaalissa, kolmiokytkennässä	98
6.4	Kaksi staattorikäänitysvikaa yhdessä vaiheessa kolmiokytkennässä	102
6.4	Kaksi staattorikäänitysvikaa yhdessä vaiheessa tähtikytkennässä	106
7	Vikapuu rutiinikoestukseen	110
8	Johtopäätökset	118
	Jatkotutkimusmahdollisuuksia	119
	Lähteet	122
	Liite	130

Kuvat

Kuva 1.	Sähkömoottorin poikkileikkaus komponentteineen (NEMA, 2013).	18
Kuva 2.	Erään kestopagneettimoottorin staattori kokonaisuudessaan (a) ja yksi staattorin laminaatiokerros (b) (Hayes & Goodarzi, 2018, s. 207, mukaillen).	20
Kuva 3.	Kestomagneetit asetettu roottorin pinnalle kokonaan (a), kestopagneetit asetettu roottorin sisälle osittain (b) ja kestopagneetit asetettu roottorin sisälle kokonaan (c) (Haddad, 2016).	23
Kuva 4.	Magneettien eri asennustapoja sisäkestopagneettimoottorin roottoriin. Magneetit V-muodossa (a), magneetit U-muodossa (b), magneetit kaksois-V -muodossa (c), magneetit kolmiossa (d), magneetit kaksoistangentiaalisesti (e), magneetit tangentiaalisesti (f), ja magneetit asennettu radiaalisesti (g) (Song ja muut, 2019, mukaillen; Ikäheimo & Kolehmainen, 2008, mukaillen).	25
Kuva 5.	Kestomagneettimoottorin ja moottorikäytön jaottelu eri perustein (Mishra ja muut, 2014, mukaillen).	26
Kuva 6.	Kestomagneettimoottorin vikojen jaottelu (Thamke ja muut, 2015, mukaillen).	27
Kuva 7.	Viat kestopagneettimoottorin magneeteissa (HBK Electric Power Testing, 2021).	29
Kuva 8.	Sähkömoottorin staattorikäämityksen vika, tapauksissa maasulku (a), kierrossulku (b), oikosulku vaiheiden välillä (c) (Halmesmäki, 2010; Csanyi, 2020, mukaillen).	32
Kuva 9.	Toistoaaltokokeen tulos maasulussa (Seppälina, 2013).	33
Kuva 10.	Kestomagneettiroottorin magneettien liimaamiseen ja asennukseen tarkoitettu laitteisto (KaiHung Machinery, 2020)	36
Kuva 11.	Virhe kaapelikengän puristuksessa (Seppälina, 2013).	37
Kuva 12.	Eräs esimerkki kestopagneettimoottorin vian diagnosoinnin menetelmien jaottelusta (Chen ja muut, 2019; Usman ja muut, 2017; Bhuiyan ja muut, 2020).	38

Kuva 13.	Mittauksiin valikoitui kuvassa oleva aksiaalivuokone.	41
Kuva 14.	Testatun kestopagneettimoottorin roottori (a) ja staattori (b).	43
Kuva 15.	Staattori kytketty tähteen (a) ja kolmioon (b). U-vaiheen neljän staattorikäänin sijainti roottorissa (c) (Jordan, 2018, mukaillen).	44
Kuva 16.	Ehjän moottorin vaiheiden pääjännitteet vaiheittain tähtikytkennässä.	48
Kuva 17.	Vastajännitteen taajuusspektri tähtikytkennässä.	49
Kuva 18.	Ehjän tähtikytkennän osoitindiagrammi.	49
Kuva 19.	KytKentäalusta, staattorikäänitys kolmiokytkennässä.	50
Kuva 20.	Kolmiokytkennän pääjännitteet.	51
Kuva 21.	Vastajännitteen taajuusspektri kolmiokytkennässä ehjän moottorin tapauksessa.	52
Kuva 22 .	Virta staattorikäänneissä, kun moottori on kytketty kolmioon.	52
Kuva 23.	Staattorin vaihevirran spektri.	54
Kuva 24.	Osoitindiagrammi kolmiokytkennässä.	54
Kuva 25.	Roottorista irrotettiin A:lla merkitty kestopagneetti.	56
Kuva 26.	Moottorin pääjännitteet, kun magneetti on irrotettu tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).	57
Kuva 27.	Tähtikytkennän laskennallinen käänmivuo, kun magneetti irrotettu.	59
Kuva 28.	Magneetin irrottamisen vaikutus vastajännitespektriin, kun ehjä ja viallinen moottori ovat tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).	60
Kuva 29.	Osoitindiagrammi magneetin irrotuksen jälkeen kolmiokytkennässä (a) ja tähtikytkennässä (b).	62
Kuva 30.	Staattorivirta magneetin irrotuksen takia kolmiokytkennässä.	63
Kuva 31.	Virran taajuusspektri magneetin irrotuksen vuoksi kolmiokytkennässä.	64
Kuva 32.	Pääjännitteet tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b), kun magneetti on käännetty väärinpäin.	65
Kuva 33.	Vastajännitespektri tähtikytkennässä, kun magneetti on joko irrotettu tai laitettu väärinpäin.	66
Kuva 34.	Kolmiokytkennän staattorivirta, kun magneetti on käännetty väärinpäin kolmiokytkennässä.	67

Kuva 35.	Kolmiokytkennän virran spektri, kun magneetti käännetty väärinpäin.	68
Kuva 36.	Vaihejännitteiden osoitindiagrammi, kun magneetti on väärinpäin kolmiokytkennässä (a) ja tähtikytkennässä (b).	69
Kuva 37.	Pääjännitteet testissä, jossa kaksi staattorikäämiä on väärinpäin kolmiokytkennässä.	71
Kuva 38.	Moottorin U-vaihe kytkettynä oikein (Jordan, 2018, mukailten).	72
Kuva 39.	KytKentä, kun U- ja V vaiheen käämit ristissä (Jordan, 2018, mukailten).	73
Kuva 40.	Vastajännitteen taajuusspektrien vertailu, kun kaksi käämiä on väärinpäin kolmiokytkennässä ja ehjän moottorin tapauksessa.	74
Kuva 41.	Kolmiokytkennän virta, kun kaksi käämiä on väärinpäin.	75
Kuva 42.	Kolmiokytkennän staattorivirran spektri, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin.	76
Kuva 43.	Osoitindiagrammi, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin kolmiokytkennässä.	76
Kuva 44.	Pääjännitteet tähtikytkennässä, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin.	78
Kuva 45.	Vastajännitteen taajuusspektri tilanteissa, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin ja kun moottori on ehjä tähtikytkennässä.	79
Kuva 46.	Jännitteen osoitindiagrammi tilanteessa, kaksi käämiä on kytketty väärinpäin tähtikytkennässä.	80
Kuva 47.	U-vaiheen kytKentä, kun käämisilmukoita on siirretty käämistä a_2 vierekkäiseen käämiin, joka on V-vaiheen ensimmäinen käämi. U-vaiheeseen muodostuu tällöin uusi vaihekäämi, joka tässä on merkitty tunnisteella a_2' .	81
Kuva 48.	Pääjännitteet tilanteessa, kun käämiä viereisessä urassa kolmiokytkennässä.	82
Kuva 49.	Vastajännitteen spektri, kun käämiä on viereisessä urassa kolmiokytkennässä. Vertailu ehjään tilanteeseen nähden.	83
Kuva 50.	Staattorivirta, kun käämiä on viereisessä urassa.	84
Kuva 51.	Käämiä viereisessä urassa, staattorivirran spektri.	85

Kuva 52.	Osoitindiagrammi, kun käämiä viereisessä urassa. Kolmiokytkentä.	86
Kuva 53.	Vastajännitteet tähtikytkennässä, kun käämiä viereisessä urassa.	87
Kuva 54.	Jännitespektri, kun viereisessä urassa on käämiä.	88
Kuva 55.	Jännitteen osoitindiagrammi tähtikytkennässä, kun käämiä vierekkäisessä urassa.	88
Kuva 56.	Pääjännitteet, kun ilmarakoa pidennetty tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).	90
Kuva 57.	Vastajännitteen taajuusspektrin vertailu ehjään perustapaukseen, kun ilmarakoa on kasvatettu tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).	91
Kuva 58.	Osoitindiagrammi tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).	92
Kuva 59.	Staattorivirta, kun ilmaväliä kasvatettiin (a) ja ehjän moottorin tapauksessa (b) kolmiokytkennässä.	93
Kuva 60.	Virran spektri, kun ilmaväliä kasvatettu (a) ja ehjän moottorin virran spektri (b).	94
Kuva 61.	Normaali tähtikytkentä (a) (Mohammed ja muut, 2023) ja kytkentä, jossa U-vaihe oikosulussa (b).	95
Kuva 62.	Pääjännitteet kuvan 59b mukaisessa vikatilanteessa, jossa U-vaihe on oikosulussa tähtikytkennässä.	96
Kuva 63.	Osoitindiagrammi vikatilanteessa.	97
Kuva 64.	Staattorivirta, kun U vaihe oikosulussa.	98
Kuva 65.	Kolmiokytkentä (a) (Mohammad ja muut, 2023) ja muuttunut kytkentätilanne (b).	99
Kuva 66.	Kytkenävirhe kolmiokytkennässä, kun kaapelit U1 ja U2 vaihtaneet paikkaa.	100
Kuva 67.	Staattorivirta, kun U1 ja U2 ovat vaihtaneet paikka kolmiokytkennässä.	101
Kuva 68.	Kytkenäterminaalivirhe, kun moottori on kolmiokytkennässä.	102
Kuva 69.	U-vaihe, kun kaksi käämiä ohitettu (a). Staattorikytkentä yläpuolelta katsottaessa (b).	103

Kuva 70.	Jännitteen spektri, kun kaksi käämiä ohitettu ja kun oikea kytkentä kolmiokytkennässä.	104
Kuva 71.	Pääjännitteet kolmiokytkennässä, kun kaksi käämiä on ohitettu ja vaihe on väärinpäin.	105
Kuva 72.	Osoitindiagrammi kolmiokytkennässä, kun kaksi käämiä ohitettu.	106
Kuva 73.	Pääjännitteet tähtikytkennässä, kun kaksi käämiä ohitettu yhdessä vaiheessa.	107
Kuva 74.	Vastajännitespektrit tähtikytkennässä, kun kaksi käämiä on ohitettu yhdessä vaiheessa.	108
Kuva 75.	Mitattu osoitindiagrammi, kun kaksi käämiä on ohitettu ja vaihe on käännetty väärinpäin yhdessä vaiheessa tähtikytkennässä (a). Teoreettinen osoitindiagrammi, kun kaksi käämiä on ohitettu yhdessä vaiheessa tähtikytkennässä (b).	109
Kuva 76.	Vikapuuahmotelma vikadiagnostiikan avuksi.	111
Kuva 77.	Vikapuun ensimmäinen oksa.	112
Kuva 78.	Kehitetty vikapuu, jossa osoitindiagrammin avulla on voitu diagnosoida ero staattorin käämitysviassa ja roottorin magneettiviassa.	113
Kuva 79.	Juurisyyanalyysi, kun on päätelty vian olevan roottorissa tai ilmvälissä.	114
Kuva 80.	Juurisyyanalyysi spektrin avulla.	115
Kuva 81.	Toimenpiteet, kun osoitindiagrammi on epäsymmetrinen.	116
Kuva 82.	Tarkempi juurisyyanalyysi viallisten vaiheiden löytämiseksi.	117
Kuva 83.	Osoitindiagrammi, kun U-vaihe on käännetty väärinpäin (a), W-vaihe on käännetty väärinpäin (b), V-vaihe käännetty väärinpäin (c) moottorin terminaalilla.	120
Kuva 84.	Näkymä FEMM:in magneetin ominaisuuksien määrittelystä.	121
Kuva 85.	Vikapuu kestopagneettimoottorin rutiinikoestukseen	130

Taulukot

Taulukko 1.	Mahdollisia kestopagneettimoottorin valmistusprosessin aikana syntyneitä vikoja. (Butov & Verl, 2014, mukailten).	28
Taulukko 2.	Esimerkkejä kestopagneettimoottorin sähköisistä vioista.	31
Taulukko 3.	Testattavan moottorin geometriset spesifikaatiot. (Jordan, 2018).	45
Taulukko 4.	Mittaukset päivämäärineen.	47
Taulukko 5.	Vastajännitteen spektrin ensimmäiset yhdeksän pyörimisnopeuden monikertaa ehjässä tilanteessa, ja magneettivian aikana.	61

Kreikkalaiset symbolit

ϕ	Magneettivuo
π	Ympyrän kehän suhde halkaisijaansa
ω_r	Roottorin pyörimisnopeus
μ_{rPM}	Kestomagneetin permeabiliteetti
$\lambda_{käämi}$	Yhden käämin käämivuo
θ_r	Avaruuskulma radiaaneina
θ_{PM}	Magneetin leveys radiaaneina
θ_1	U-vaiheen vaihejännitteen vaihekulma
θ_2	V-vaiheen vaihejännitteen vaihekulma
θ_3	W-vaiheen vaihejännitteen vaihekulma
η	Oikosuljettujen vaihesilmukoiden määrään suhde kaikkiin vaihekäämin silmukoiden määrään per vaihe

Roomalaiset symbolit

a1	U-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi
a2	U-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi

a_2'	U-vaiheeseen muodostunut vaihekäämi, kun käämilankaa siirretään toiseen vaiheeseen
a_3	U-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi
a_4	U-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi
A_{G1}	Ilmavälin poikkipinta-ala magneetin yläpuolella
\mathbf{B}	Magneettivuontiheyden vektori
b_1	V-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi
b_2	V-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi
b_3	V-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi
b_4	V-vaiheen ensimmäinen vaihekäämi
B_{g1}	Vuontiheys magneetin yläpuolella
B_r	Kestomagneetin remanenssivuo
B_r	Kestomagneetin remanenssivuo
u_n	Tähtipistejännite
dS	Infinitesimaalinen pinta-ala
e_1	Indusoitunut vastajännite ensimmäisessä vaiheessa
e_2	Indusoitunut vastajännite toisessa vaiheessa
e_3	Indusoitunut vastajännite kolmannessa vaiheessa
$e_{\text{terve}}(t)$	Vastajännite per yksikkö yhdessä vaiheessa, kun moottori on ehjä
$e_{\text{vika}}(t)$	Vastajännite per yksikkö yhdessä vaiheessa
f	taajuus
f_{demag}	Vikataajuus demagnetoitumisen johdosta
f_s	Sähköinen taajuus
f_{syn}	Synkronitaajuus
f_{vika}	Vikataajuus

g	Ilmavälin pituus
I	Sähkövirran voimakkuus
$I_s(f)$	Staattorivirta taajuuden funktiona
$i_s(t)$	Staattorivirta
i_{vika}	Vikavirta
k	Positiivinen kokonaisluku
k_d	Demagnetoitumisaste
L_{11}	Vaiheinduktanssi
l_{PM}	Magneetin pituus
M_{12}	U- ja V-vaiheen välinen keskinäisinduktanssi
M_{13}	W- ja U-vaiheiden välinen keskinäisinduktanssi
n_{koko}	Magneettien määrä
$n_{vaikuttavat}$	Demagnetoituneiden magneettien määrä
p	Napapariluku
R_s	Vaiheresistanssi
R_{vika}	Kierrossulkuresistanssi
t	aika
U	jännite
U_1	U-vaiheen ensimmäinen johdinpää
U_{11}	Ensimmäisen vaiheen vaihejännite
$u_{12}(t)$	Pääjännite U- ja V- vaiheiden välillä
U_{1p}	U-vaiheen vaihejännitteen perustaajuinen komponentti
U_{1v3h}	U-vaiheen vaihejännitteen kolmas harmoninen komponentti
U_2	U-vaiheen toinen johdinpää
U_{22}	Toisen vaiheen vaihejännite

$u_{23}(t)$	Pääjännite V- ja W-vaiheiden välillä
U_{2p}	V-vaiheen vaihejännitteen perustaajuinen komponentti
U_{2v3h}	V-vaiheen vaihejännitteen kolmas harmoninen komponentti
$u_{31}(t)$	Pääjännite W- ja V-vaiheiden välillä
U_{33}	Kolmannen vaiheen vaihejännite
U_{3p}	W-vaiheen vaihejännitteen perustaajuinen komponentti
U_{3v3h}	W-vaiheen vaihejännitteen kolmas harmoninen komponentti
U_{rms1}	U-vaiheen jännitteen tehollisarvo
U_{rms1o}	U-vaiheen jännitteen tehollisarvon osoitin
U_{rms2}	V-vaiheen jännitteen tehollisarvo
U_{rms2o}	V-vaiheen jännitteen tehollisarvon osoitin
U_{rms3}	W-vaiheen jännitteen tehollisarvo
U_{rms3o}	W-vaiheen jännitteen tehollisarvon osoitin
$U_{terve}(f)$	Ehjän moottorin vastajännite taajuuden funktiona
$U_{vika}(f)$	Vikaantuneen moottorin vastajännite taajuuden funktiona
V_1	V-vaiheen ensimmäinen johdinpää
V_2	V-vaiheen toinen johdinpää
V_{nN}	Kahden tähtipisteen välinen jännite
W_1	W-vaiheen ensimmäinen johdinpää
W_2	W-vaiheen toinen johdinpää

Lyhenteet

ABB	Asea Brown Boveri, teollisuuskonserni
BEMF	Back electromotive force, vastasähkömotorinen voima
BLDC	Brushless DC electric motor, harjaton tasasähkömoottori

EEC	Electrical Equivalent Circuit. Sähköinen sijaiskytkentä.
EEP	Electrical Engineering Portal. Sähkötekniikkaan keskittynyt verkkosivusto
FEM	Elementtimenetelmä
HBK	Hottinger, Brüel & Kjær. Teknologiyritys.
IEC	International Electrotechnical Commission, sähköalan standardointiorganisaatio
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers, sähkötekniikan ja elektroniikan yhdistys
MCSA	Motor current signal analysis, moottorin virran signaalinkäsittelyä
MEC	Magnetic equivalent circuit, magneettinen sijaiskytkentä
NEMA	National Electrical Manufacturers Association, sähkölaitevalmistaja
PMSM	Permanent magnet synchronous motor, kestopagneetti-tahtimoottori
Std	Standard, standardi.

1 Johdanto

ABB:n (2019) moottorioppaan arvion mukaan, noin 65 % globaalista sähköenergiasta kuuluu sähkömoottoreissa. Oppaassa myös todetaan, että samalla kun maailmanlaajuinen energiantarve kasvaa, paine päästöjen minimoimiseksi on myös noussut viime vuosina. Tästä syystä tehokkaille ja suorituskykyisille sähkömoottoreille on teollisuudessa suuri tarve.

Norgren (2022) määrittelee sähkömoottorin energiamuuntimeksi, jossa laitteeseen syötetty sähkövirta muunnetaan mekaaniseksi liikkeeksi. Norgrenin mukaan liike on yleensä pyörimisliikettä ja sitä voidaan käyttää hyväksi lineaarisen liikkeen aikaansaamiseksi.

Kestomagneettimoottorissa pyörijä eli roottori on muodostettu kestopagneeteista, ja staattorissa on käämitys (Infineon 2022). Wangin ja Lengin (2018) mukaan kestopagneettimoottori soveltuu ominaisuuksiensa puolesta hyvin suurnopeussovelluksiin. Heidän mukaansa verrattuna muihin moottorityyppeihin kestopagneettimoottori on kevyt, pienikokoinen, suuri tehotiheydeltään ja sillä on hyvät dynaamiset ominaisuudet.

Kestomagneettimoottorille ominainen rakenne, etenkin roottorin kestopagneetit, aiheuttavat haasteita tämän moottorityypin testaamiselle. Toisin kuin oikosulkumoottorin tapauksessa kestopagneettimoottorista on haasteellista tehdä sijaiskytkentää, joka helpottaisi vikojen analysointia.

Kestomagneettimoottorin testaamiseen löytyy erinäisiä standardeja. Ehkä käytetyimmät standardit etenkin Euroopassa ovat IEEE Std 1812™-2014/2016, IEEE Std 115 ja IEC 60034-2-1. Kohdeyritys, eli ABB oy, käyttää koetuksissa etenkin IEC-standardia.

Kohdeyrityksellä oli tarve päivittää kestopagneettikoneisiin liittyvää dokumentaatiota. Tutkielman tavoitteena onkin selvittää kestopagneettimoottorin vikoja, niiden synty mekanismeja sekä apukeinoja vikojen diagnosointiin. Näiden tavoitteiden vuoksi tähän tutkielmaan asetettiin seuraavat tutkimuskysymykset:

- Mitkä ovat kestopagneettimoottorin viat, ja miten ne voidaan kategorisoida tutkimuskirjallisuuden perusteella?
- Miten kestopagneettimoottorin vikoja on mahdollista selvittää tuotannossa käytettävillä mittalaitteilla?
- Miten kohdeyrityksen kestopagneettimoottorien rutiinikoestusta voisi muuttaa, jotta voidaan poikkeavan tuloksen sattuessa saada selville moottorin vika?

Tässä tutkielmassa on yhteensä yhdeksän päälukua. Ensimmäinen pääluku on johdanto, jossa kerrotaan motiivi työn tekemiselle sekä tutkimuskysymykset. Toisessa pääluvussa syvennytään kestopagneettimoottorin rakenteeseen ja toimintaan. Kolmannessa pääluvussa on selvitetty kestopagneettimoottorin vikoja tutkimuskirjallisuuden avulla. Neljännessä pääluvussa on esitetty mittauksissa käytetty kestopagneettimoottori. Viidennessä pääluvussa on esitelty moottorille aiheutettuja roottorivikoja ja niiden tulkintaa. Kuudennessa pääluvussa on esitetty kestopagneettimoottorin staattorivikojen mittaustuloksia. Seitsemännessä pääluvussa on esitetty aiheutetut viat, jotka eivät varsinaisesti jakaudu edellisten lukujen staattori- tai roottorivikoihin. Kahdeksannessa pääluvussa on esitetty mittaustulosten perusteella muodostettu vikapuuprosessi, jonka avulla voidaan löytää testatulle moottorille aiheutetut viat. Yhdeksännessä pääluvussa on esitetty tutkimuksen johtopäätökset ja yhteenveto, ja mahdolliset jatkotutkimusaiheet.

1 Kestomagneettimoottori

Le Doeuff ja El Hadi Zaim (2010, s.49) määrittelevät, että sähkökone on energianmuunnin, jolla voidaan muuttaa liike-energiaa sähköenergiaksi, tai sähköenergiaa liike-energiaksi. Heidän kirjansa mukaan sähkökone koostuu roottorista, staattorista, näiden välistä ilmavälistä, ja myös kuparijohtimista. He myös toteavat, että staattori ja roottori johtavat vuota moottorin sisällä, mikä mahdollistuu roottori- ja staattorirakenteiden suurella permeabiliteetilla. Sen vuoksi staattorin ja roottorin materiaalina käytetään usein ferromagneettisia materiaaleja (Le Doeuff ja El Hadi Zaim, 2010, s.49).

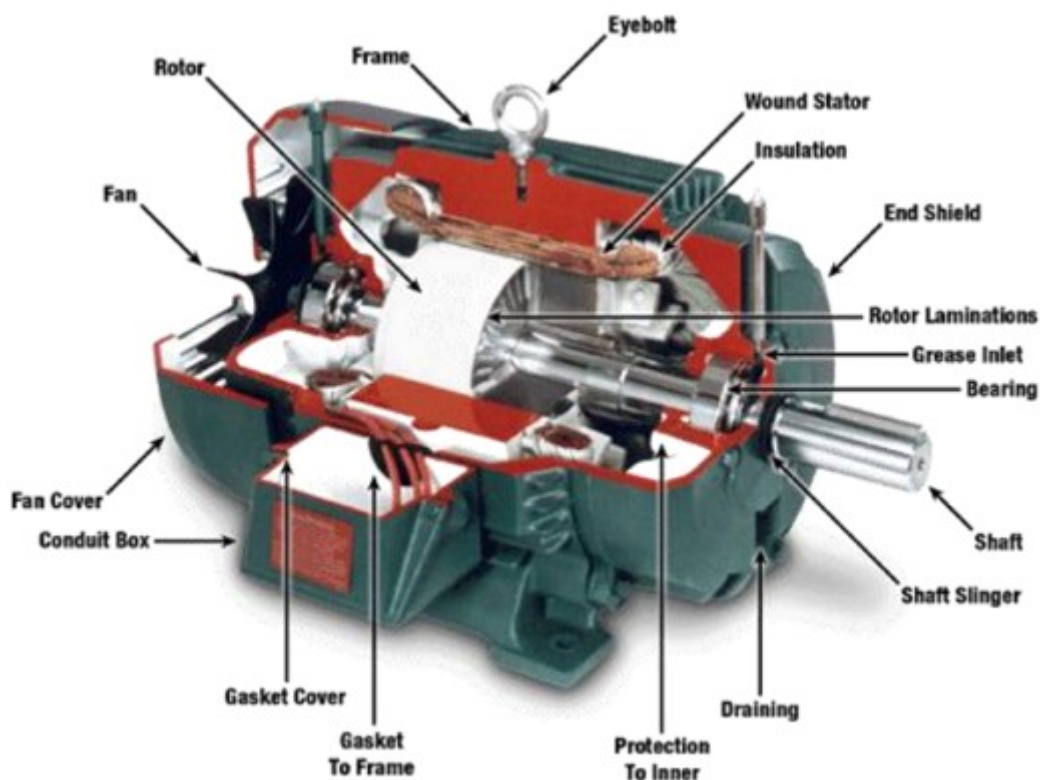
NEMA (2013) esittää yksinkertaistettuna sähkömoottorin toiminnan. Esityksen mukaisesti staattorin kolmivaihekäämitys aiheuttaa moottorin sisälle pyörivän magneettikentän. Heidän mukaansa oikosulkumoottorissa staattorin aiheuttama kenttä indusoi oikosulkuhäkkiin jännitteen ja siten virran, joka myös luo roottoriin magneettikentän. NEMA:n esityksen mukaan epätahtikoneessa, kuten oikosulkumoottorissa, jos roottorin magneettikenttä ja staattorin kenttä pyörivät tahdissa, induktiota ei tapahdu ja moottori ei toimi. NEMA:n esityksessä käy myös ilmi, että kenttien välinen ero, eli jättämä, aiheuttaa moottorin momentin. Tahtikoneissa, kuten kestopagneettimoottorissa, roottorin ja staattorin kentät voivat pyöriä samaa nopeutta sillä kestopagneettimoottorin toiminta ei perustu samalla tavalla sähkömagneettiseen induktioon.

Kestomagneettimoottorin toiminta eroaa muista sähkömoottorityypeistä. Muun muassa Mishra ja muut (2014) kuvaavat tutkimuksensa teoreettisessa osuudessa kestopagneettimoottorin ominaista toimintaa. He toteavat, että kestopagneettimoottorin pyöriessä roottorin ja staattorin vastakkaiset magneettisen navat kohtaavat, ja ne lukittuvat magneettisesti. Tutkimuksessa todetaan, että koska staattorin navat määräytyvät staattorin muodostaman pyörivän magneettikentän perusteella, kentän ja täten napojen pyöriessä roottori seuraa magneettikentän pyörimistä lukittautumisen takia. Mishra ja muut toteavat myös, että kuormittamattomassa tilanteessa navat ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden, mutta moottorin ollessa kytkettynä kuormaan staattorin navat pyörivät roottorin

napoja edellä. He määrittelevät moottorin mekaaniseksi kulmaksi vaihekulman roottorin ja staattorin napojen välillä.

1.1 Kestomagneettimoottorin rakenne

Kestomagneettimoottori on sähkömoottori, jossa kestmagneetit on asetettu roottoriin magnetoinnin mahdollistamiseksi (Pyrhönen ja muut, 2014, s. 156, s. 389). Kestomagneettimoottoria voidaan kutsua itsemagnetoituvaksi moottoriksi, koska moottorin magnetointia ei aiheuta toinen teholähde (Rayner, 1995, s. 223). Kuvassa 1 on erään sähkömoottorin poikkileikkaus. Sähkömoottori sisältää edellä mainittujen lisäksi muun muassa jäähdytysjärjestelmän, akselin ja eristyksen.



Kuva 1. Sähkömoottorin poikkileikkaus komponentteineen (NEMA, 2013).

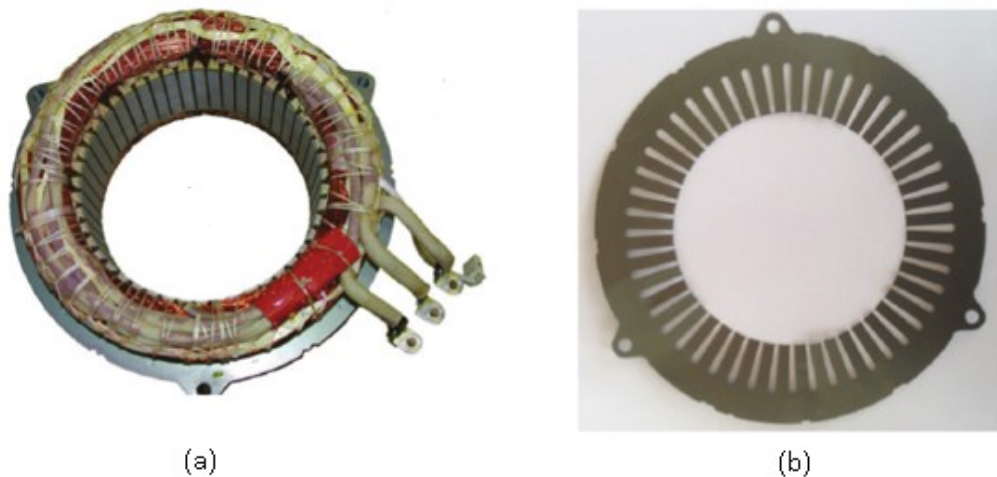
1.1.1 Kestomagneettimoottorin staattori

Kestomagneettimoottorin staattorin toiminnan periaate on esitetty mm. Hayes & Goodarzin, (2018, s. 163, 165–166, 207) kirjassa. Kirjassa todetaan, että kestomagneettimoottorin staattori koostuu kolmivaihekäämityksestä ja rungosta jonne käämitykset on asetettu. Staattorin kolmivaihekäämitys voidaan kytkeä joko tähteen tai kolmioon. Heidän mukaansa tähän käämitykseen syötettävät vaihe-erolliset vaihevirratt muodostavat moottorin sisään pyörivän magneettikentän. Tämän pyörivän magneettikentän taajuutta kutsutaan synkroniseksi taajuudeksi f_{syn} , joka voidaan Hayes ja Goodarzin (2018, s. 165) mukaan määritellä:

$$f_{syn} = \frac{f_e}{p/2}, \quad (1)$$

missä f_s on staattoriin syötettävän jännitteen taajuus ja p on napapari-luku. Tämä pyörivä magneettikenttä on vuorovaikutuksessa roottorin luomaan magneettikenttään, mikä aiheuttaa moottorin vääntömomentin. Kestomagneettimoottorin roottorin magneettien ja staattorin vuon aiheuttamaa vääntömomenttia voidaan Hayesin ja Goodarzin mukaan kutsua magneettiseksi vääntömomentiksi. Staattorin vuon ja roottorin rautamateriaalin välistä vääntömomenttia he taas kutsuvat reluktanssimomentiksi.

Kuvassa 2 on esillä eräs staattori ja yksi laminaatiokerros. Staattori koostuu useasta ferromagneettisesta materiaalista koostuvasta laminaatiokerroksesta (Hayes & Goodarzi, 2018, s. 208). Klempner ja Kerszenbaum (2004, s. 35–36) mukaan nämä kerrokset eristetään toisistaan molemmilta puoliltaan. Heidän mukaansa laminoinnin tarkoituksena on vähentää magneettivuon aiheuttamia pyörrevirtahäviöitä staattorin rautaosissa. He myös toteavat, että eristyksellä voidaan rajoittaa pyörrevirtojen etenemistä yhdestä laminaatiokerroksesta alempiin tai ylempiin kerroksiin. Tällöin heidän mukaansa eristys voi siten vähentää pyörrevirtojen suuruutta, niiden aiheuttamia häviöitä ja lämpenemää.



Kuva 2. Erään kestomagneettimoottorin staattori kokonaisuudessaan (a) ja yksi staattorin laminaatiokerros (b) (Hayes & Goodarzi, 2018, s. 207, mukailten).

Staattori sijaitsee staattorirungossa (engl. stator frame). Staattorirungon periaate on esitetty esimerkiksi Klempnerin ja Kerzenbaumin kirjan alussa (2004, s. 39–40). Heidän mukaansa sen tarkoituksena on pitää staattori paikallaan ja tukea sen rakennetta. Kirjassa myös todetaan, että staattorirunko ei kuitenkaan saa olla liian jäykkä rakenne, sillä sen pitää pystyä mukailemaan staattorin lämpölaajenemisia ja -supistumisia. He toteavat, että on kannattavaa käyttää staattorirungon materiaalina esimerkiksi vähähiilistä terästä, joka kestää hyvin hitsausta.

1.1.1.1 Staattorikäänitys

Kestomagneettimoottorin staattorissa on monivaihekäänitys, joka luo pyörivän magneettikentän moottorin ilmaväliin. Kolmivaihemoottorissa on kolme käänitystä, yksi jokaiselle vaiheelle.

Ideaalisessa tapauksessa jokaisen vaiheen käänitys on identtinen. Hayesin ja Goodarzin (2018, s. 208) mukaan ideaalisessa moottorissa käänit pyritään sijoittamaan geometrisesti staattoriin siten, että kahden eri käänin välillä on 120 astetta. Tällöin homogeenisen pyö-

rivän magneettikentän muodostuminen on mahdollista. Staattorin kolme vaihetta voidaan kytkeä perinteisesti joko tähtikytkentään tai kolmiokytkentään (Mohammed, 2023). Samalla Hayes ja Goodarzi (2018, s. 209) kuitenkin toteavat, että kolmiokytkennässä staattorin vaihejännite on suurempi kuin tähtikytkennässä. Näiden lisäksi on myös mahdollista kytkeä staattorikäimejä sarjaan tai rinnan (Dumont ja muut, 2017).

Staattorikäimitys voidaan jaotella myös valmistusmenetelmän mukaan. Stonen ja muiden, 2014 (s. 12–13) mukaan käämisilmukoihin perustuvat staattorikäimitykset voidaan jaotella satunnaisesti käämittyihin staattoreihin sekä muotokäämittyihin staattoreihin. Satunnaisesti käämityt staattorit voidaan punoa käsin. Tällöin jokainen käämisilmukka on punottu uriin hieman eri tavalla ja esimerkiksi tekijästä ja koneesta riippuen yksilölliset erot staattoreissa voivat olla todella suuria. Stonen ja muiden mukaan muotokääminässä staattorisilmukat ja käämitys tehdään tietyn muotin mukaan, ja niiden mitat eroavat toisistaan todella vähän. Heidän mukaansa tällöin silmukoiden välinen potentiaaliero on pieni, verrattuna satunnaisesti punottuihin staattorikäimeihin. He myös toteavat, että muotokäämintää siten käytetäänkin suuremman jännitetaso koneissa, jolloin yleensä kyseessä on jännitetasoltaan yli 1000 voltin sähkömoottorit. Kirjan mukaan satunnaisesti käämitetyt staattorit ovat rajoitettuja pienempiin jännitetasoihin, alle 1000 V, sillä mahdolliset suuret jännitetasojen erot vierekkäisten staattorisilmukoiden välillä vaativat merkittävästi suuremman johdineristyksen.

1.1.2 Kestomagneettimoottorin roottori

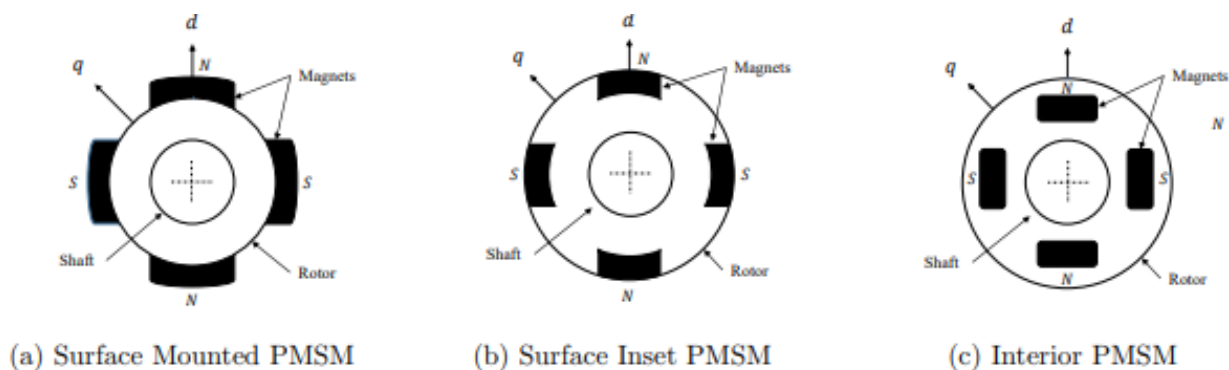
Roottori on kestopagneettimoottorin pyörivä komponentti. Kirjassaan Hayes ja Goodarzi (2018, s. 166) toteavat, että kestopagneettimoottorin roottoriin on asetettu kestopagneetit, joiden aiheuttama magneettivuon tiheys on vuorovaikutuksessa staattorin pyörivään magneettikenttään aiheuttaen vääntömomentin.

Klempner & Kerzenbaum, (2004, s. 212) mukaan roottorin viat, kuten akselin epätasapaino ja osien löysä kiinnitys, näkyvät yleensä roottorin värähtelyn lisääntymisenä. Sa-

malla he toteavat, että moottorin ominaisuuksien mittaamiseen käytettävien mittalaitteiden liittäminen roottoriin on kuitenkin haasteellista. Täten vikadiagnostiikassa mittalaitteet liitetään yleensä muualle moottoriin.

Sähkömoottoreita käsittelevässä kirjassaan Le Doeuff & El Hadi Zaim, (2010, s.123–125) toteavat, että kestopagneettimoottorissa magneetit on asetettu roottoriin sähkömoottorin magnetoinnin mahdollistamiseksi. Kestomagneetikoneen roottoriin magneetit voidaan asettaa usealla eri tavalla. Heidän mukaansa kestopagneetit voidaan asettaa roottorin pinnalle, sen sisälle joko kokonaan roottoriin upotettuna tai vain osittain. Haddad (2016) on myös kategorisoinut kestopagneettimoottorit magneettien sijoituspaikan perusteella. Hänen ja esimerkiksi Flettin (1994) mukaan roottoria, jossa magneetit ovat roottorin pinnalla koholla, kutsutaan pintakestopagneettimoottoriksi (engl. surface mounted permanent magnet motor). Jos kestopagneetit on sijoitettu roottorin sisään, kutsutaan moottoria Haddadin ja Flettin mukaan sisäkestopagneettimoottoriksi (engl. interior permanent magnet motor). Jos kestopagneetit on upotettu roottorin pinnalle, voidaan sitä heidän mukaansa kutsua sisäpintakestopagneettimoottoriksi (engl. surface inset permanent magnet motor).

Kuvassa 3 on kolme eri kestopagneettiroottorin rakennetta Hayes & Goodarzin (2018, s. 166–167) kirjan mukaisesti. Kestomagneettimoottorityypit eroavat lähinnä kestopagneettien sijainnissa roottorissa. Hayesin ja Goodarzin mukaan upotettu magneettirakenne sopii parhaiten suurnopeussovelluksiin ja on siten yleinen roottorirakenne esimerkiksi sähköautosovelluksissa.



Kuva 3. Kestomagneetit asetettu roottorin pinnalle kokonaan (a), kestomagneetit asetettu roottorin sisälle osittain (b) ja kestomagneetit asetettu roottorin sisälle kokonaan (c) (Haddad, 2016).

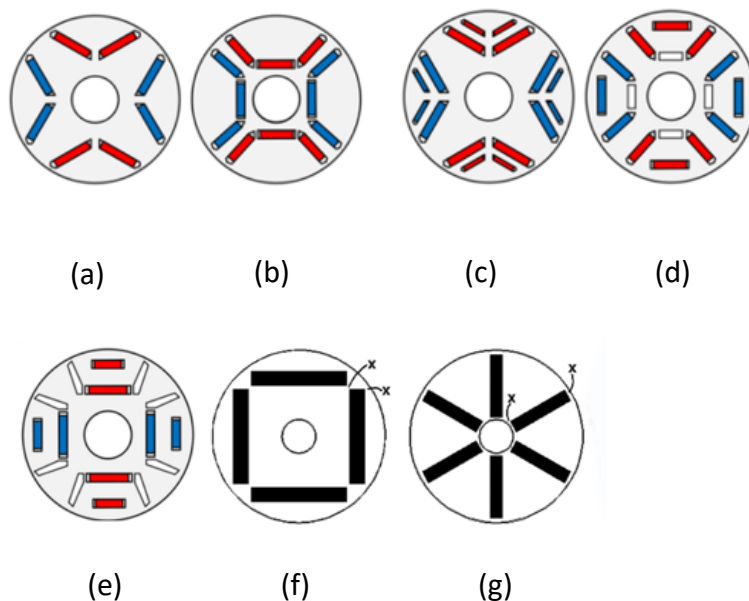
Pintakestomagneettimoottorin etu on kestomagneettien asentamisen helppous roottoriin. Mishra ja muut (2014) kuitenkin toteavat, että pintakestomagneettimoottorissa ongelmaksi voi muodostua kestomagneettien irtoaminen roottorista suurnopeussovelluksissa. Roottorirakenne, johon magneetit on asetettu pintaan, soveltuvat paremmin matalanopeussovelluksiin (Hayes & Goodarzi, 2018, s. 166–167). Kohdeyritys ABB oy:n moottorityyppien roottoreissa magneetit ovat upotettuina.

Sisäkestomagneettimoottori ei ole yhtä yleinen verrattuna pintakestomagneettimoottoriin, mutta se on vankemman asennustapansa vuoksi parempi vaihtoehto suurnopeussovelluksiin (Mishra ja muut, 2014). Sisäkestomagneettimoottorin vääntömomentti suhteessa moottorin painoon on suurnopeussovelluksissa myös parempi, ja sen hinta on alhaisempi pintakestomagneettimoottoriin verrattuna (Mishra ja muut, 2014). Dong ja muut (2016) mukaan pintakestomagneettimoottori on kuitenkin vankempi, käynnissä viileämpi ja vähemmän altis kestomagneettien demagnetoitumiselle. Sisäkestomagneettimoottorissa magneetit voidaan asettaa roottorin sisälle usealla eri tavalla. Nämä eri asennustavat roottorissa vaikuttavat merkittävästi moottorin ominaisuuksiin, kuten poikittais- ja pitkittäisreaktansseihin, ja kestomagneettien hyvällä sijoituksella voidaan siten optimoida sisäkestomagneettimoottorin toimintaa (Wang ja muut, 2011; Zheng ja muut, 2015). Yamada ja muut (2014) ovat myös sisäkestomagneettimoottorin roottorin ja mag-

neettien sijaintia muokkaamalla saaneet vähennettyä harvinaisten maametallien tarvetta roottorissa. Heidän mukaansa tämä rakenne pienentää todennäköisyyttä, että roottorin kestopagneetit demagnetoituisivat pysyvästi.

Mishra ja muut (2014) toteavat, että nämä kaksi yleisintä kestopagneettimoottorityyppiä ovat myös sähkömagneettisilta ominaisuuksiltaan erilaisia. Heidän mukaansa pinta-kestopagneettimoottorin poikittais- ja pitkittäisreaktanssit ovat likipitään samat, kun taas sisäkestopagneettimoottorin poikittaisreaktanssi on yleensä suurempi kuin pitkittäisreaktanssi. Kestopagneettien permeabiliteetin ollessa miltei yhtä suuri kuin ilman, voidaan kestopagneetteja pitää heidän mukaansa osana ilmaväliä. Täten pintakestopagneettimoottorien pinta-asennus aiheuttaa suuremman ilmavälin sisäkestopagneettimoottoriin verrattuna.

Kuvassa 4 on esitetty eri kestopagneettimoottorien roottoritopologioita. Magneettien asennustavalla roottoriin on vaikutusta moottorin ominaisuuksiin. Song ja muut (2019) ovat vertailleet eri magneettien asennustapoja. Tutkimuksessa jokainen asennustavan roottorit optimoitiin käyttäen muokattua hiukkasparvioptimointia sekä elementtimenetelmää. Tämän jälkeen moottorien ominaisuuksia verrattiin keskenään. Kaksois-V-rakenne oli paras tehoalueen suhteen sen hyvien kentänheikennysominaisuuksien vuoksi. Kaikkien kaksoisrakenteiden rautahäviöt olivat pienemmät kuin yksittäisrakenteissa suurnopeusalueella. Kaksoisrakenteiden magneettien demagnetoituminen oli myös vähäisempää. Yksittäiseen V-muotoon asennettuna moottorin hinta ja kestopagneettien paino oli pienin. Kaksoisrakenteet siis parantavat useita moottorin ominaisuuksia, mutta lisäävät moottorin hintaa.

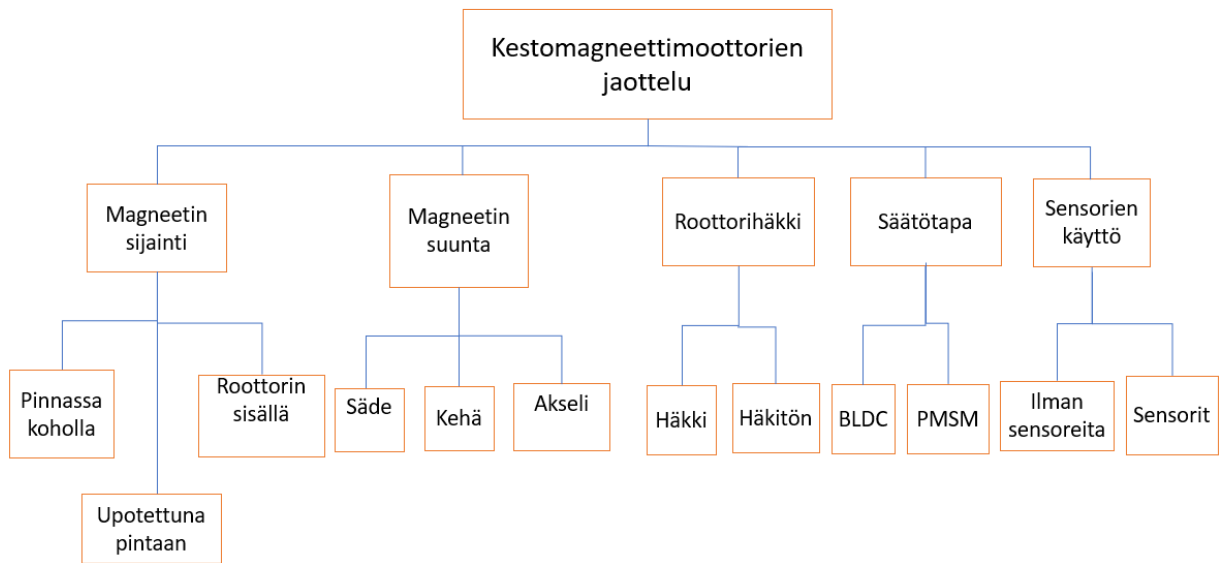


Kuva 4. Magneettien eri asennustapoja sisäkestomagneettimoottorin roottoriin. Magneetit V-muodossa (a), magneetit U-muodossa (b), magneetit kaksois-V -muodossa (c), magneetit kolmiossa (d), magneetit kaksoistangentiaalisesti (e), magneetit tangentiaalisesti (f), ja magneetit asennettu radiaalisesti (g) (Song ja muut, 2019, mukaillen; Ikkäheimo & Kolehmainen, 2008, mukaillen).

1.2 Kestomagneettimoottorityypit

Edellä kuvassa 3 sivulla 19 on esitetty kolme yleistä kestopagneettimoottorityyppiä. Kestomagneettimoottoreita voidaan kuitenkin myös luokitella magneettien sijoitustapojen lisäksi esimerkiksi magneettien asennon ja siitä johtuvan vuon suunnan perusteella, mikä nähdään kuvasta 4 s. 23. Kestomagneettimoottoreita voidaan kuitenkin näiden lisäksi jaotella muillakin tavoilla.

Kuvassa 5 on eroteltu kestopagneettimoottorityyppejä eri perustein. Yleisin on tapa jaotella kestopagneettimoottori magneettien sijoituspaikan perusteella, mutta kuten kuvasta 5 nähdään, moottoreita voidaan jaotella myös esimerkiksi säätötavan perusteella.

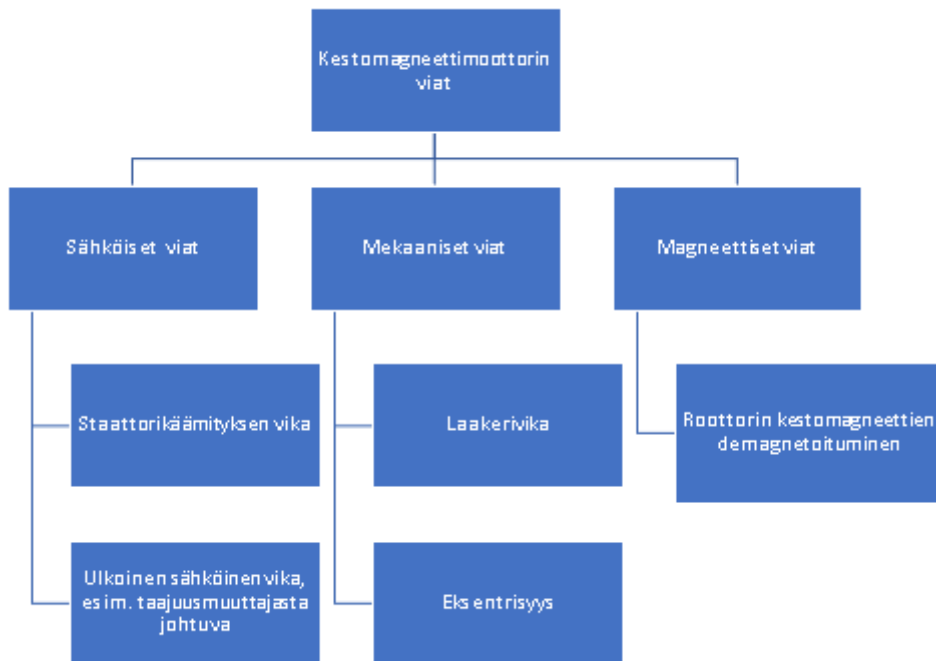


Kuva 5. Kestomagneettimoottorin ja moottorikäytön jaottelu eri perustein (Mishra ja muut, 2014, mukaillen).

2 Kestomagneettimoottorin sähkömagneettiset viat

Kestomagneettimoottorin viallinen toiminta voi johtua useasta eri syystä. Kestomagneettimoottorin vikoja voidaan pyrkiä jaottelemaan vikojen syntyperän perusteella.

Kuvassa 6 näkyy kestomagneettimoottorin jaottelua. Thamke ja muut (2015) ovat jaotelleet viat sähköisiin, mekaanisiin ja magneettisiin vikoihin. Yksittäiset vikatyypit, kuten eksentrisyys, jakautuvat vielä muihin kategorioihin.



Kuva 6. Kestomagneettimoottorin vikojen jaottelu (Thamke ja muut, 2015, mukailen).

Sähköiset viat johtuvat yleensä virheellisestä staattorikäätymien kytkennästä, maadoitusvirheistä, staattorivaiheen oikosulusta tai kokonaisen vaiheen olemisena avoimena. Staattorikäätymien vikojen suhteesta kaikkiin sähkömoottorin vikoihin löytyy tutkimuskirjallisuudesta useita arvioita. Tavner (2008) muiden muassa arvioi, että noin 35 % vioista johtuu staattorikäätymien viasta kaikilla moottorityypeillä.

Mekaaniset viat liittyvät moottorirakenteen fyysisiin vikoihin. Näissä vioissa jossakin moottorin rakenteissa, on tapahtunut fyysistä vahinkoa, kuten kulumaa. Monet mekaaniset viat ovatkin kaikille moottorityypeille universaaleja. Moottorin laakerivika on sähkömoottoreissa hyvin yleinen, ja arviolta noin 41 % kaikista vioista kaikilla moottorityypeillä johtuu laakerivioista (Motor Reliability Working Group, 1985).

Kuvan 6 vikojen lajittelu on kuitenkin suhteellisen geneerinen ja tässä tapauksessa sitä ei voida soveltaa kohdeyrityksen kestomagneettimoottorien vikatilanteisiin. Kuvan 6 viat nimittäin ilmenevät yleisimmin etenkin sähkömoottorien kunnonvalvonnassa, eivätkä ne ole niinkään valmistusprosessin aikana syntyneitä. Sähkömoottorin valmistuksen aikana syntyneet viat ovatkin tyypiltään erilaisia kuin kunnonvalvonnassa havaitut viat (Halmesmäki, 2010). Kuitenkin näitä vikoja voi syntyä myös jo valmistusvaiheessa.

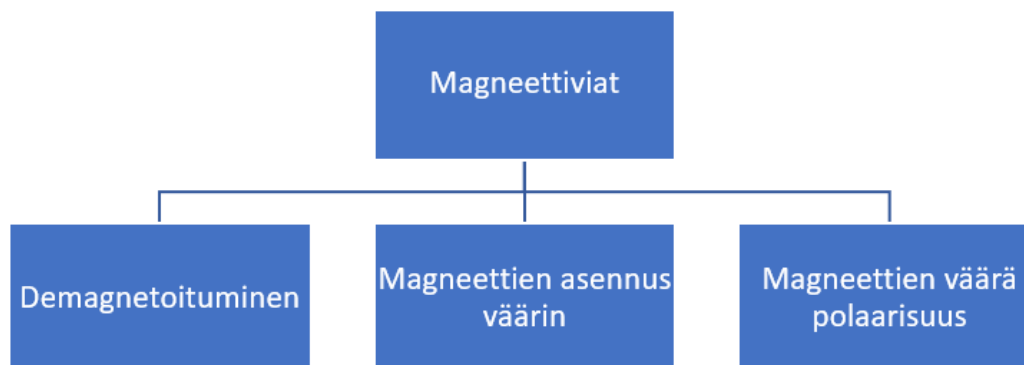
Taulukossa 1 on esitetty kestomagneettimoottorin laatuvirheitä, joita voi syntyä moottorin valmistusprosessin aikana. Kuten nähdään verrattaessa kuvaan 6, on kunnonvalvonnassa havaittavissa vioissa sekä valmistusprosessin laatuvirheissä samojakin vikoja, kuten eksentrisyys, käämivika sekä viat magneeteissa.

Taulukko 1. Mahdollisia kestomagneettimoottorin valmistusprosessin aikana syntyneitä vikoja (Butov & Verl, 2014, mukaillen).

Staattorin valmistusaikana syntyneet viat	Roottorin valmistusaikana syntyneet viat	Sähkömoottorin kokoamisen aikana syntyneet viat
Eristysvika	Demagnetoituminen	Laakeriviat
Vika lämpötilasensorin kaasaamisessa	Magneettivika	Eristysvika
Staattorikäämivika	Vika roottorin laminoinnin aikana	Resolverin asennusvika
Kytchentävika	Vika sähköisissä liitoksissa	Roottorin eksentrisyys
Vika staattorihampaissa	Roottorin epätasapaino	Liitinviika
		Oikosulut

Moottori voi myös olla kunnossa, mutta joku edellä esitetyistä laatuvirheistä voi ilmetä virheellisesti. Tämä yleensä johtuu esimerkiksi väärin kalibroidusta mittalaitteesta, tai

mittaajan virheellisestä toiminnasta. Esimerkiksi mittalaite voidaan kytkeä väärin. Mittalaite ja mittaaja ovatkin melko merkittävä epävarmuustekijä sähkömoottorien mittaus-tapahtumissa. Magneettien mahdolliset laatuvirheet valmistusprosessin aikana on esi-tetty kuvassa 8.



Kuva 7. Viat kestomagneettimoottorin magneeteissa (HBK Electric Power Testing, 2021).

Kaikki nämä viat aiheuttavat muutoksia kestomagneettimoottorin indusoimaan vasta-jännitteeseen moottorin staattorikäymyksessä. Kestomagneettimoottorin indusoimaa jännitettä voidaan siten eri vikatilanteissa tutkia, ja eri suoritusarvoja analysoimalla voi-daan saada paljonkin informaatiota moottorin vian luonteesta. Lähteen HBK Electric Po-
wer (2021) mukaan eräs kestomagneettimoottorin vikatilanteissa tutkittavista suureista on ns. vastajännitevakio, joka lasketaan jakamalla vastajännitekuvaajan suurin amplitudi roottorin pyörimisnopeudella. IEEE standardissa (2015, s.41) todetaan, että kyseinen va-kio on pääsääntöisesti käytössä harjattomien, puolisuunnikasvoisten (engl. trapezoidal flux) tasasähkömoottorien ominaisuuksien laskennassa. Standardin mukaan tätä vakiota kutsutaan myös vääntömomenttivakioksi. Tällä vakiolla voidaan kuitenkin IEEE:n stan-dardin mukaan approksimoida vastajännitettä ja siinä tapahtuvia muutoksia kestomag-neettimoottorin tapauksessa. Tämän arvon muutos kertoo viasta, mutta tämän arvon perusteella vikaa ei voida kuitenkaan erotella muista, sillä tämän arvon muuttuminen tapahtuu miltei kaikissa kestomagneettimoottorin vioissa. Muutokset ja poikkeamat kes-tomagneeteissa vaikuttavat myös vääntömomentin aaltoisuuteen (engl. ripple) (Heins ja

muut, 2011), magneettien remanenssivuontiheyteen sekä magnetaation suuntaan (Coe-
nen ja muut, 2012).

Eräs uusi varteenotettava vikasuure vastajännitevakion käyttämisen sijasta on moottorin
vuon mittaus. Muun muassa mittausjärjestelmiin erikoistunut HBK Industries käyttää ky-
seistä mittaussuureta vian diagnosointiin.

2.1 Sähköiset viat

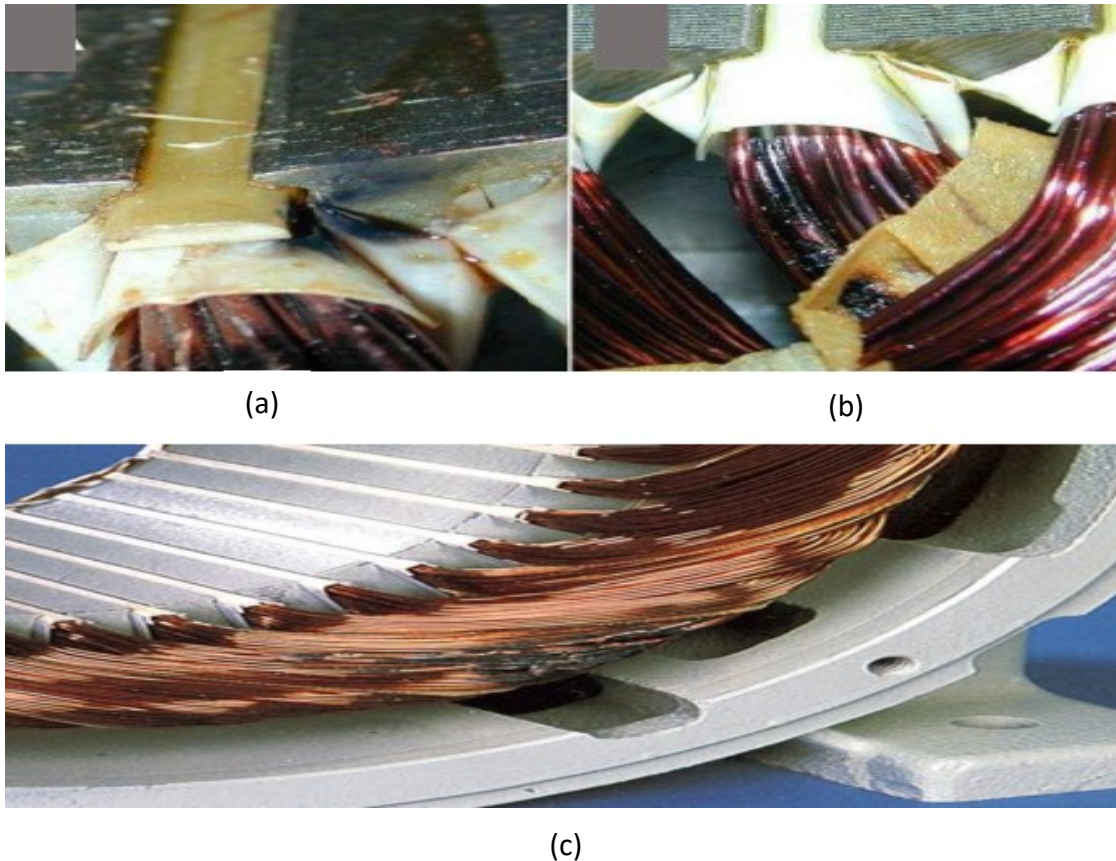
Kestomagneettimoottorin tapauksessa sähköiset viat liittyvät staattorikäämityksen vikoi-
hin. Vikoja voivat olla esimerkiksi oikosulku staattorikäämityksen kierrosten välillä, vai-
heiden välillä sekä maasulku.

Taulukossa 2 on esitetty kestopagneettimoottorille syntyviä mahdollisia sähköisiä vikoja.
Taulukossa on myös listattu eri mittausmenetelmiä, joilla näitä vikoja voidaan saada
havaittua. Kaikki viat ovat staattorissa tai taajuusmuuttajassa, sillä roottorissa ei yleensä
ole käämitystä kestopagneettimoottorin tapauksessa.

Taulukko 2. Esimerkkejä kestomagneettimoottorin sähköisistä vioista.

Vika	Selite	Testi / suure vian löytämiseksi
Oikosulku käämisilmukoiden välillä	Yleensä eristys pettää kierrossilmukoiden välillä. (Stone & Kapler, 1998).	Aiheuttaa vikavirran $i_{vika} = -\frac{\eta(u_1 - u_n)}{\eta(1-\eta)R_s + R_{vika}}$ (Du & Wu, 2016) $f_{vika} = \left(1 \pm \frac{2k+1}{p}\right) f_{syn}$ (Faiz & Nejadi-Koti, 2017)
Oikosulku vaiheiden välille	Samassa urassa oleviin kahden vaiheen käämin välille. (Alawady ja muut, 2020).	Vaihevastusmittaus Toistoaltokoe
Vaihe avoimena	Vaihejohdin poikki	Vaihevastusmittaus Toistoaltokoe Staattorivirtamittaus (Hang ja muut, 2016)
Maasulku	Johtimien ja staattorirungon väliin syntyy jatkuvuus. (Seppälina, 2014; Halmesmäki, 2010).	Toistoaltokoe
Taajuusmuuttajassa vika	Vika yleensä puolijohdekytkimissä (Hang ja muut, 2016).	Vaihevirtamittaus tai nollajännitemittaus (Hang ja muut, 2016)

Eräät staattorikäälityksen viat näkyvät kuvassa 8. Kuten nähdään, sähköiset viat aiheuttavat paljon vahinkoa staattoreihin, ja usein ainoa korjaustoimenpide onkin vaihtaa uusi staattori.



Kuva 8. Sähkömoottorin staattorikämmityksen vika, tapauksissa maasulku (a), kierrossulku (b), oikosulku vaiheiden välillä (c) (Halmesmäki, 2010; Csanyi, 2020, muokailen).

ABB oy Motors and Generators testaa tuotannossa valmistetut kestmagneettimoottorien staattorit toistoaltokokeen avulla. Tällä testillä on tarkoitus havaita mahdolliset viat staattorin kämmityksessä. Toistoaltokokeessa vaihekäämeihin syötettävän jännitepulsstin vastetta eli heijastetta vertaillaan ja analysoidaan. Erot vaihekäämien välillä voivat viitata vikaan. Kuten taulukon 2 perusteella voidaan päätellä, maasulku sekä vaihesulku ovat erotettavissa hyvin testin avulla, mutta kierrossulun vaste on hyvin samankaltainen kuin ehjän moottorin tapauksessa (Kuusisto, 2012).

Kuvassa 9 on esitetty maasulun heijaste toisto-aaltokokeessa (Seppälä 2013). Toisto-aaltokoe tehdään yleensä moottorille rutiinikokeuksissa. Kestomagneettimoottorin tapauksessa roottorin magneetit voivat vahingoittua mittalaitteen syöttämän jännitepulsin vuoksi. Täten toisto-aaltokoe ei voidakaan tehdä kestomagneettimoottorille rutiinikokeuksen aikana (Pantti, 2018), joten toisto-aaltokoe tehdään jo pelkille staattoreille kestomagneettimoottorien tapauksessa. Tässä ongelmana on se, että staattorin käämit voivat vielä vahingoittua jossain tuotannon vaiheessa, mikä ei ole kuitenkaan yleistä.



Kuva 9. Toisto-aaltokokeen tulos maasulussa (Seppälä, 2013).

2.2 Magneettiset viat

Magneettiset viat ovat kestomagneetikoneiden tyyppivika. Siinä kestomagneetikoneiden magneettien kyky luoda magneettikenttää on heikentynyt. Kestomagneetteihin voi tulla erilaisia koloja ja säröjä, jotka vaikuttavat kestomagneettimoottorin toimintaan (Zafarani, 2018). Kestomagneetit voivat sen lisäksi demagnetoitua. Ishikawa ja muiden (2013) mukaan suuresta staattorivirrasta johtuva suuri magneettivuon tiheys, magneettien ikääntyminen, suuri magneettien lämpötila ja suuret staattorin tai taajuusmuuttajan oikosulkuvirrat ovat muun muassa syitä, minkä vuoksi magneetit voivat demagnetoitua.

Pietrzak ja muiden (2023) mukaan demagnetoituminen nostaa kestopagneettimoottorikäytön staattorikämmityksen lämpötilaa, moottorin tärinää, melua ja kuparihäviöitä. Heidän mukaansa demagnetoituminen vaikuttaa myös vääntömomenttiin, staattorivirtoihin ja -jännitteisiin. Sen lisäksi ilmapälin magneettivuon tiheys ei ole enää symmetrinen. Jos kestopagneetit tuottavat vielä magneettikenttää eivätkä ole täysin demagnetoituneet, kutsutaan ilmiötä osittaiseksi demagnetoitumiseksi (engl. partial demagnetization) (Chen ja muut 2019).

Yksi syy kestopagneettien demagnetoitumisen varhaisen havaitsemisen tärkeydelle on kestopagneettien kallis hinta (Faiz & Exiri, 2015). Fitourin ja muiden (2018) mukaan kestopagneettimoottorin demagnetoituminen on sekä merkittävin vika että yksi yleisimmistä kestopagneettimoottorin vioista.

Faiz ja Nejadi-Kotin (2016) mukaan kestopagneettimoottorin demagnetoituminen näkyy useassa kestopagneettimoottorista mitattavassa suureessa. Osittainen demagnetoituminen aiheuttaa epäsymmetrisyyttä moottorissa, mikä ilmenee staattorivirran harmonisina komponentteina. Staattorivirran harmoniset yliaallot f_{demag} demagnetoitumisen jälkeen voidaan määrittellä

$$f_{\text{demag}} = f_e \left(1 \pm \frac{k}{p}\right), k = 1, 2, 3, 4 \dots \quad (2)$$

missä f_e on perustaajuus, k on kokonaisluku ja p on napapariiluku. Näiden taajuuskomponenttien amplitudi kasvaa, samalla kun kestopagneettien demagnetoituminen kasvaa.

Faiz & Nejadi-Koti (2016) toteavat, että kestopagneettien demagnetoituminen näkyy myös kestopagneettien staattorikämmehin indusoituneessa vastajännitteessä. Heidän mukaansa osittainen demagnetoituminen näkyy vastajännitteen harmonisina komponentteina, mutta näiden harmonisten komponenttien määrä ja amplitudi riippuvat staattorikämmityksen topologiasta. Vastajännitteen suuruus kuitenkin laskee aina riippu-

matta topologiasta. Vastajännitteen suuruus $e_{\text{vika}}(t)$, eli vastajännite per yksikkö yhdessä vaiheessa vikatilanteessa kestopagneettien demagnetoitumisen seurauksena voidaan määrittellä

$$e_{\text{vika}}(t) = \frac{n_{\text{vaikuttavat}}}{n_{\text{koko}}} \quad (3)$$

$$e_{\text{vika}}(t) = k_d e_{\text{terve}}(t) \quad (4)$$

missä $n_{\text{vaikuttavat}}$ on toimivien ja magneettikenttää tuottavien kestopagneettien määrä, n_{koko} kestopagneettien kokonaislukumäärä, sekä k_d on demagnetoitumisaste sekä $e_{\text{terve}}(t)$ on ehjän moottorin vastajännite per vaihe (Faiz & Nejadi-Koti, 2016).

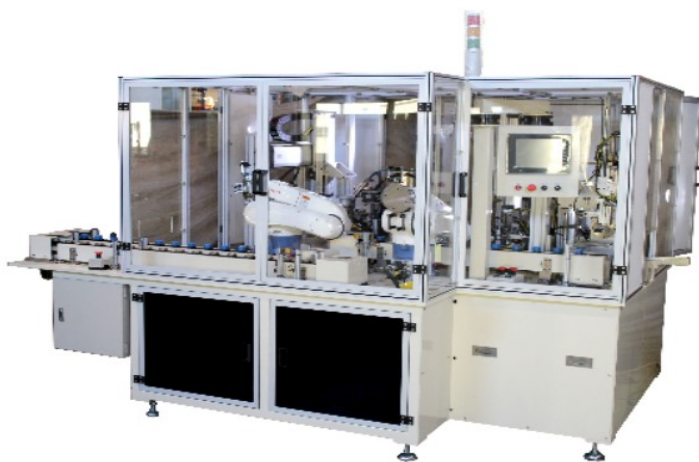
2.3 Mekaaniset viat ja muut valmistusprosessiin liittyvät viat

Kestopagneettimoottorin vikoihin kuuluvat myös esimerkiksi mekaaniset viat, väärät kytkennät, magneettien ladonnan epäonnistuminen roottoriin ja tasapainotuksen epäonnistuminen. Magneettien ladonnan epäonnistuminen riippuu myös ladontatavasta, sillä magneetit voidaan asentaa roottoriin käsin tai käyttäen tarkoituksenmukaisia automaattilaitteistoja.

Chen ja muut (2019) jaottelevat mekaaniset viat ilmavälin erisuuruuteen, rakenteiden – kuten muttereiden – löysyyteen, akselin taipumiseen, laakerivikoihin, ja magneetin fyysiseen kulumiseen. Laakeriviat ilmenevät laakerin rakenteissa koloina tai pieninä kouroumina (Stack, ja muut, 2004). Haddad on väitöskirjassaan (2016) määrittellyt mekaanisia vikoja, jotka johtuvat moottorin ilmavälin erisuuruudesta. Määrittelyn mukaisesti ilmavälin erisuuruus, eli eksentrisyys, voi tarkoittaa, että roottori on kohdistettu väärin suhteessa staattoriin, mikä aiheuttaa, että ilmaväli ei olekaan vakio joka kohtaa ilmaväliä. Haddadin mukaan dynaaminen eksentrisyys puolestaan tarkoittaa, että roottorin pyörimisakseli ei ole keskellä roottoria. Tästä johtuen ilmavälin pituus ei ole vakio. Sen lisäksi

ilmavälin pituus vaihtelee tietyssä avaruuskulmassa roottorin pyöriessä, toisin kuin staattisessa eksentrisyydessä. Ilmavälivika voi olla myös näiden kahden eksentrisyyden yhdistelmä.

Kuvassa 10 on eräs magneettien latomiseen tarkoitettu laitteisto. Kohdeyrityksessä, ABB oy:ssä, magneettien ladonta roottoriin tehdään käsin. Tällöin todennäköisyys, että magneetit asennetaan väärin, esimerkiksi väärinpäin, kasvaa.



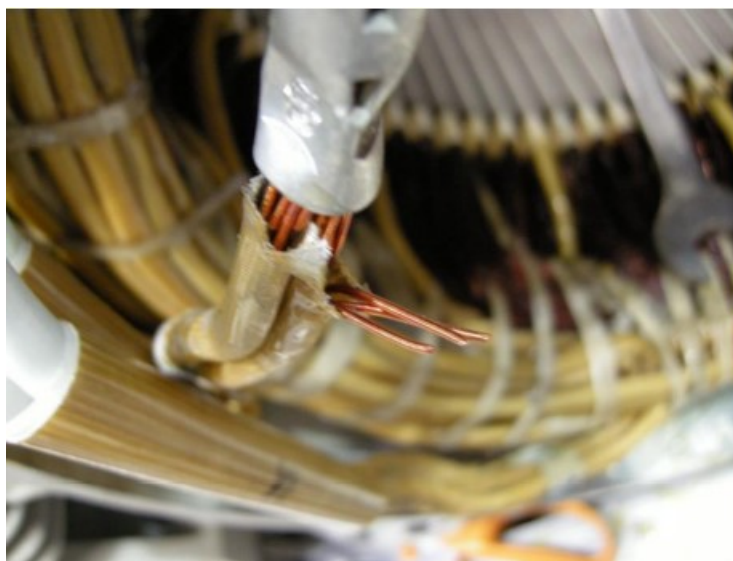
Kuva 10. Kestomagneetti-roottorin magneettien liimaamiseen ja asennukseen tarkoitettu laitteisto (KaiHung Machinery, 2020)

Tero Käsäkangas (henkilökohtainen keskustelu, 27.6.2023) kertoi henkilökohtaisessa keskustelussa eräästä kestopagneettimoottorin tuotantoprosessin aikana tapahtuvasta vikatilanteesta. Hänen mukaansa, kun magneetit asennetaan roottoriin, liiman on annettava kuivua jonkin aikaa. Joskus kohdeyrityksen moottorituotannossa kuitenkin kiirehdi-tään tämän asian kanssa liikaa. Suurnopeusmoottorien tapauksessa roottori tasapaino-tetaan magneettien kanssa. Käsäkankaan mukaan, jos liima ei ole kuivunut kunnolla ennen tasapainotusta, roottori voi mennä epätasapainoon.

Kestomagneettimoottorin staattorin kytkennät voidaan tehdä väärin. Seppälinnan (2013) mukaan vaiheet voidaan esimerkiksi kytkeä ristiin. Seppälinna toteaa, että kyseinen vika

ilmenee samankaltaisena kuin vaiheiden välinen oikosulku. Hänen mukaansa myös vaiheet voidaan kytkeä ylipäättään väriin uriin, jolloin pyörivä magneettikenttä ja siten myös roottori pyörivät toiseen suuntaan.

Kuvassa 11 näkyy kaapelikengän puristuksessa tapahtunut virhe. Seppälinna (2013) toteaa käämilankojen katkeamisen aiheuttavan muutoksia vaihekäämien resistansseihin, joten joissain tapauksissa puristusvirhe on mahdollista nähdä vaihevastusmittauksessa. Se riippuu kuitenkin moottorin topologiasta, sillä moninapakoneissa kaapeleita on enemmän, jolloin vaiheresistanssin muutos voi olla pieni ja tällöin se ei välttämättä näy vaiheresistanssimittauksen aikana.

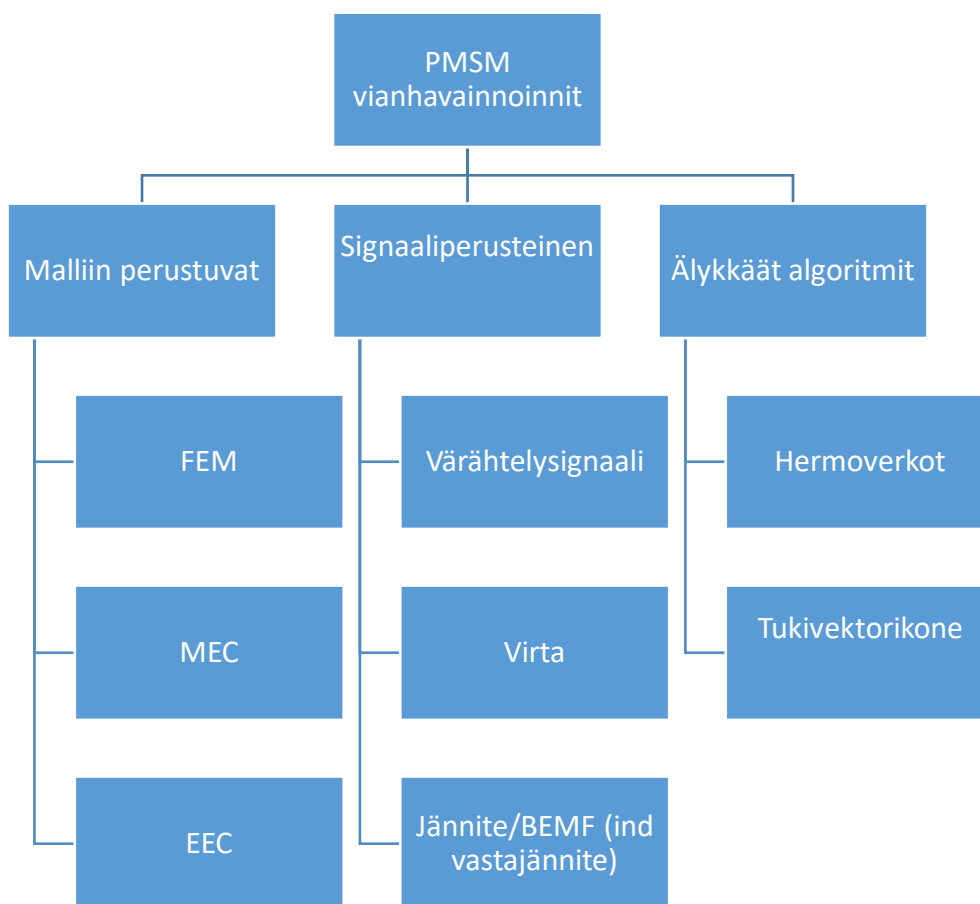


Kuva 11. Virhe kaapelikengän puristuksessa (Seppälinna, 2013).

2.4 Vikojen selvittäminen

Kestomagneettimoottorien vikojen selvittämiseen löytyy useita eri menetelmiä. Suurta osaa näistä menetelmistä käytetään kestopagneettimoottorin reaaliaikaisessa kunnonvalvonnassa. Näitä menetelmiä voidaan kuitenkin myös soveltaa tuotannossa käytettävään testaukseen.

Kuvassa 12 näkyy eräs mahdollinen kestopagneettimoottorien vian diagnosointien kategorisointi. Näitä menetelmiä voidaan käyttää yksistään, mutta myös useaa menetelmää yhtä aikaa.



Kuva 12. Eräs esimerkki kestopagneettimoottorin vian diagnosoinnin menetelmien jaottelusta (Chen ja muut, 2019; Usman ja muut, 2017; Bhuiyan ja muut, 2020).

Chen ja muut (2019) ovat jaotelleet ja esitelleet eri vikadiagnostiikkamenetelmiä katsausartikkelissaan. Artikkelin mukaan malliin perustuvassa vian diagnosoinnissa on periaatteena luoda viasta matemaattinen malli, jota käytetään sitten hyödyksi. Vian sattumassa sähkömoottoriin sen suoritusarvot muuttuvat. Malliin perustuvassa diagnosoinnissa tutkitaan matemaattisten mallien perustella, että miten nämä suoritusarvot muut-

tuvat vikatilanteessa. Chenin ja muiden artikkelin mukaan näitä teoreettisia suoritusarvojen muutoksia voidaan sitten verrata mittauksista saatuihin suoritusarvoihin, ja mahdollisesti siten havaita vika.

Usman ja muut (2017) ovat kategorisoineet malliin perustuvia menetelmiä koontiartikkelissaan. Heidän mukaansa malliin perustuvat menetelmät voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin: sähköisiin sijaiskytkentöihin (engl. electrical equivalent circuit), magneettisiin sijaiskytkentöihin (engl. magnetic equivalent circuit) ja numeerisiin malleihin. Tutkimusartikkelin mukaan sähköisiin piirikaavioihin perustuvissa menetelmissä kestopagneettimoottorista luodaan sähköinen piirikaavio, kuten kuvissa 3 ja 5. Heidän mukaansa magneettisissa piirikaavioissa luodaan malli, jossa moottorin toimintaa kuvataan magneettisin suurein, kuten reluktanssi, magneettivuo sekä magnetomotorinen voima. Koontiartikkelin mukaan magneettinen piirikaavio on tarkempi kuin sähköinen sijaiskytkentä. Usman ja muut myös toteavat, että molempien sijaiskytkentöjen etu on pieni laskentateho ja suhteellinen yksinkertaisuus.

Kolmas kategoria Usmanin ja muiden (2017) mukaan on moottorista muodostettavat numeeriset mallit. Heidän mukaansa numeerisiin malleihin perustuvissa menetelmissä kestopagneettimoottorista luodaan tietokonesimulaatioiden avulla malli, jonka suoritusarvot ohjelmisto laskee ratkaisemalla Maxwellin yhtälöt numeerisesti. Nämä menetelmät ovat ylivoimaisesti tarkimpia kaikista menetelmistä, mutta vaativat eniten laskenta-aikaa ja laskentatehoa (Usman ja muut, 2017). Näihin menetelmiin kuuluvat muun muassa elementtimenetelmä, differenssimenetelmä ja rajallisen tilavuuden menetelmä (Usman ja muut, 2017; viitattu lähteeseen Toliyat & Nandi, 2013).

Signaaliperusteisessa vian havainnoinnissa mitataan jotain sähkömoottorin suuretta ja sille suoritetaan erilaisia signaalinkäsittelyn matemaattisia operaatioita. Näitä suureita ovat esimerkiksi vääntömomentti, värähtely, melu, jännite tai virta. Chen ja muiden (2019) ja LiveHV (2022) mukaan staattorivirran mittaukseen ja staattorivirran taajuusspektrin analyysiin perustuvaa menetelmää kutsutaan MCSA:ksi (engl. motor current signal analysis). Toisin siis kuin malliperusteisissa vikadiagnostiikassa, signaaliperusteisessa vikadiagnostiikassa voidaan vain empiirisesti tutkia muutoksia tiettyjen suureiden

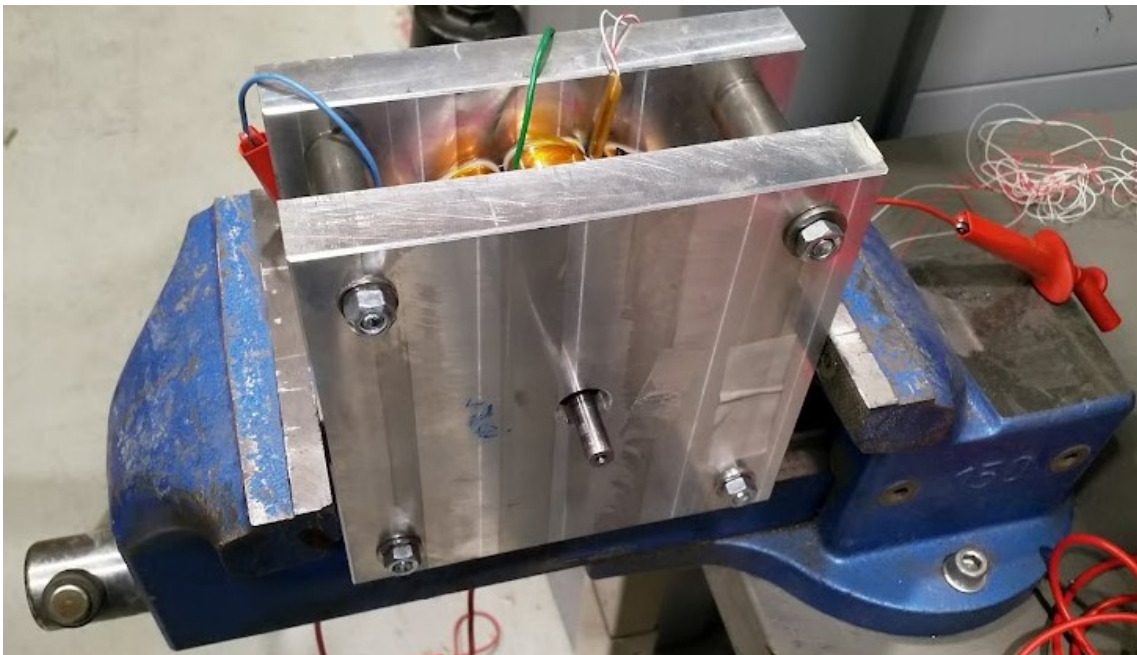
spektreissä ilman, että tarvitsee ymmärtää täsmälleen, miksi nämä muutokset tapahtuvat.

Kestomagneettimoottorin valmistuksessa syntyvien vikojen selvittäminen on haasteellista. Kuten edellä on esitetty, tutkimuskirjallisuudesta on löydettävissä selvästi erilaisia tapoja diagnosoida vikoja. Näissä menetelmissä on ongelmana se, että näiden käyttöä on tutkimuksissa esitetty lähinnä jo valmistetun ja myydyn moottorin kunnonvalvonnassa. Tällöin kyseessä olevat menetelmät eivät aina välttämättä ole soveltuvia valmistusprosessin tarpeisiin. Sen lisäksi tuotannossa olevien mittalaitteiden kyky havainnoida vikoja on rajallinen. Myöskin kohdeyrityksen rutiinikoestajat harvoin ovat insinöörejä, joten muun muassa erilaisten spektrien periaatteiden opettelu ilman tarpeeksi syvällistä matemaattista osaamista voi olla haasteellista.

3 Vikatilanteiden mallintamisessa käytettävä kestopagneettimoottori

Tätä työtä varten aikavälillä 15–22.1.2023 suoritettiin kestopagneettimoottorin mittauksia, joissa aiheutettiin eräälle kestopagneettimoottorille erinäisiä vikatilanteita. Pyrkimyksenä oli mahdollisimman kattavasti aiheuttaa erinäisiä mahdollisia tuotannaikaisia valmistuksesta johtuvia virhetilanteita.

Kuvassa 13 on mittauksissa käytetty kestopagneettimoottori. Tämä moottori valikoitui, sillä staattorikäänitys, kytkennät sekä roottorin magneetit olivat helposti muokattavissa. Staattorikäänitys oli mahdollista kytkeä sekä kolmioon että tähteen.



Kuva 13. Mittauksiin valikoitui kuvassa oleva aksiaalivuokone.

Kestopagneettimoottoria pyöritettiin avoimena, jolloin tähtikytkennässä ei virtaa staattorikäänityksessä kulkenut. Tällöin oli mahdollista tutkia pelkästään roottorin indusoimaa vastajännitekomponenttia. Moottoria pyöritettiin porakoneella, jonka pyörimisnopeus oli noin 400 rpm.

Kestomagneettimoottorin vaihejännitteelle U_{11} voidaan määritellä

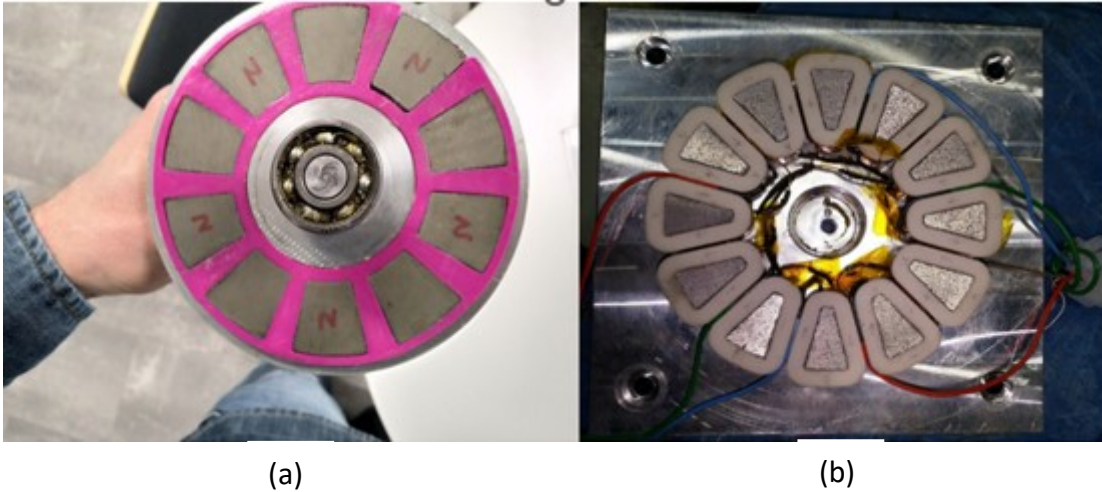
$$U_{11} = r_s i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} + e_1 + v_{nN}, \quad (5)$$

missä r_s on vaiheresistanssi, i_1 on vaiheen U virta, i_2 on vaiheen V virta, i_3 on vaiheen W virta, L_{11} on vaiheinduktanssi, M_{12} on vaiheen U ja V välinen keskinäisinduktanssi, M_{13} on vaiheiden a ja c välinen keskinäisinduktanssi, ja v_{nN} on kahden piirin muodostavan tähtipisteen välinen jännite (Zafarani, 2018). Tähtikytkennässä, kun piiri on kytketty avoimeksi, ei kulje virtaa ja siten vaiheiden välistä keskinäistä kytkeytymistä ei tapahdu. Tällöin ainoa vaihejännitteen komponentti on indusoituva vastajännite:

$$U_{11} = e_1 \quad (6)$$

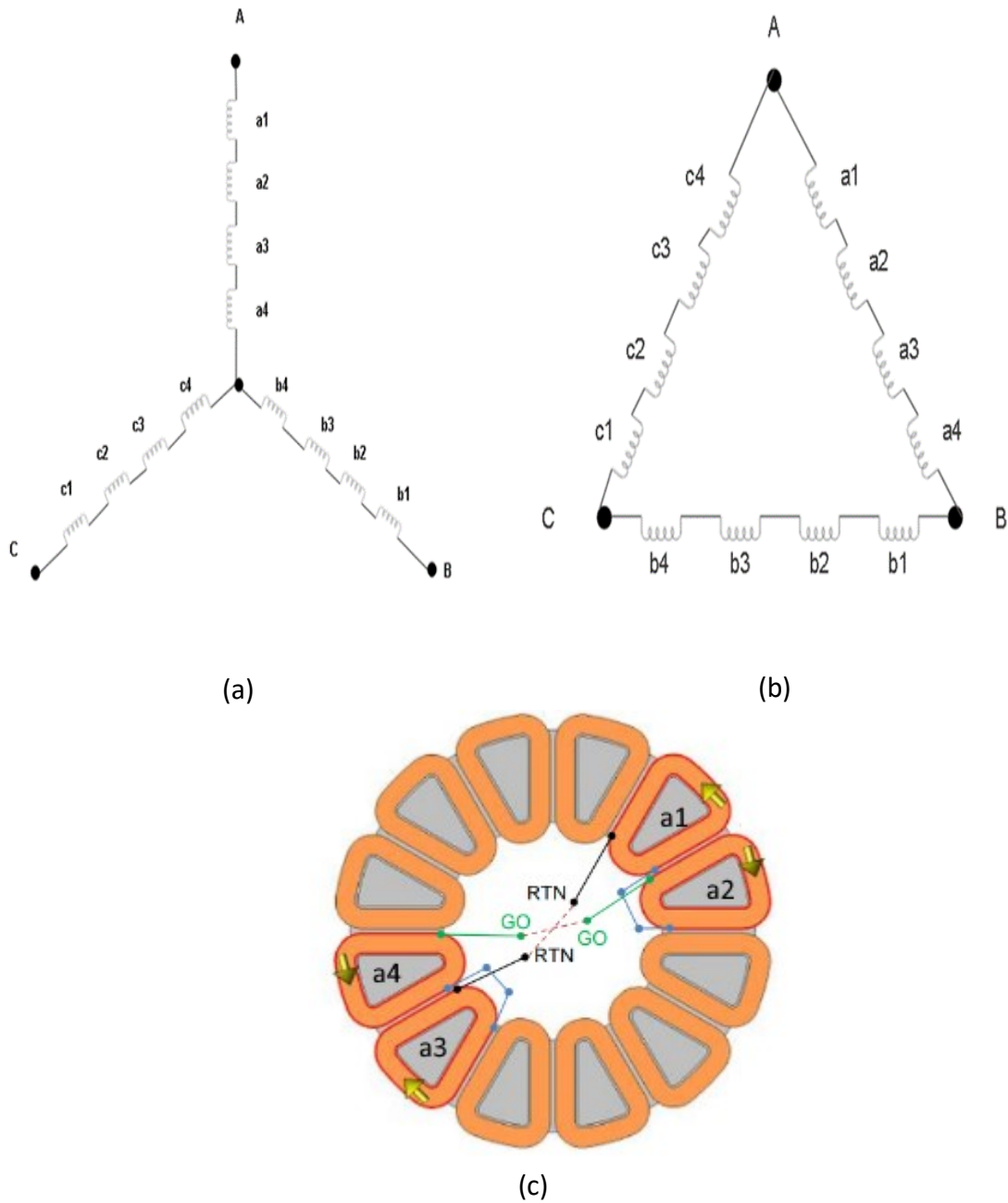
Kolmiokytkennässä virta kulkee vaiheiden staattorikäämien välissä, jolloin vaihejännitteellä on myös vaiheresistanssista, keskinäisinduktansseista ja itseinduktanssista johtuvat jännitteenalenemat.

Kuvassa 14 on testatun moottorin roottori ja staattori. Kuten nähdään, moottorissa on 10 magneettia. Magneetin irrotus roottorista oli suhteellisen helppoa. Staattorin sisäisiä kytkentöjä pystyi myös suhteellisen vaivattomasti muuttamaan, sillä kuparilangat olivat hartsaamattomia ja siten helposti liikuteltavissa.



Kuva 14. Testatun kestmagneettimootorin roottori (a), ja staattori (b).

Kuvassa 15 on moottorille tehtävät mahdolliset kytkennät. Kolmio ja tähtikytkentöjen lisäksi vaiheen käämit on mahdollista kytkeä joko rinnan tai sarjaan. Mittauksissa käämit oli kytketty sarjaan. Tämä mahdollistuu kytkemällä yhdet GO- ja RTN-johtimet yhteen, ja jättämällä toinen pari ulos- ja sisääntuloksi (Jordan, 2018). Kuvassa näytetään myös kelteisilla nuolilla suunnat, joihin yksittäiset käämit on käämitty.



Kuva 15. Staattori kytketty tähteen (a) ja kolmioon (b). U-vaiheen neljän staattori-käämin sijainti roottorissa (c) (Jordan, 2018, mukailten).

Taulukkoon 3 on listattu käytetyn aksiaalivuomoottorin geometriset arvot. Staattori- ja roottorimateriaalina käytettiin Somaloy 3P:tä, joka on Höganasin valmistamaa metallijauhetta, joka lämpökäsittelyn ja tiivistyksen jälkeen on päällystetty magneettisella oksidilla suuren permeabiliteetin mahdollistamiseksi. (Horizon Technology, 2021).

Taulukko 3. Testattavan moottorin geometriset spesifikaatiot. (Jordan, 2018).

Suure		
Staattorihammasluku	12	ul
Napojen määrä	10	ul
Sisäkehän säde	58.1	mm
Ulkokehän säde	131.9	mm
Akselin pituus	26.1	mm
Käämin leveys	5.7	mm
Käämien kierrosluku	112	ul
Staattorihampaan aksiaalinen pituus	16.6	mm
Staattorin radiaalinen korkeus	25	mm
Staattoriraudan syvyys	3	mm
Roottoriraudan syvyys	1	mm
Ilmävälän paksuus	3	mm
Magneetin syvyys	2.5	mm
Magneettien osuus koko roottorista	130	deg
Eristyksen paksuus	0.75	mm
Etäisyys käämin ja ilmävälän välillä	0.75	mm
Staattorimateriaali	Somaloy_700_3P	
Roottorin raudan materiaali	Somaloy_700_3P	
Käämimateriaali	Kupari	
Magneettimateriaali	N42UH	

Tarkastellaan seuraavaksi testatun moottorin suoritusarvot. Moottorin nimelliset sähköiset suoritusarvot olivat (Jordan, 2018):

- Nimellismomentti, 5 Nm
- Nimellisa nopeus, 3000 rpm
- Sähköinen taajuus nimellisa nopeudella, 250 Hz
- Maksimisa nopeus, 6000 rpm
- Pääjännite, 380 V
- Hyötysuhde, 89,8 %.

3.1 Mittalaitteet

Mittalaitteina moottorin testauksessa käytettiin oskilloskooppia, jännite- ja virtaprobeja, ja vaiheanalysointia. Moottoria pyöritettiin porakoneella, jonka nimellisaika oli 400 kierrosta minuutissa.

Luetellaan käytetyt mittalaitteet. Ne olivat:

- Fluke Norma 4000 Power Analyzer
- Lecroy HDO6064 – High-definition oscilloscope,
- Microohmmeter DO5000 Cropico
- Lecroy HVD3206 High voltage differential probe Lecroy HVD3206 High voltage differential probe
- Fluke i1000s AC Current probe
- Akkuporakone.

Oskilloskoopilla mitattiin pääjännitteet ja staattorivirta. Vaiheanalysointilla mitattiin osoitindiagrammi sekä U-vaiheen virta. Moottoria pyöritettiin porakoneella, jonka nopeus vaihteli mittauksen aikana. Koneen akku kului mittausten aikana, jolloin sen pyörimisnopeus pieneni. Sen lisäksi akku vaihdettiin, jolloin loppumittausten aikana sen pyörimisnopeus taas kasvoi.

Taulukossa 4 on mittauspöytäkirja. Käytännössä 17.1.2023 tarkastettiin vaihevastusmittauksen, eristysvastusmittauksen ja vaihejärjestyksen mittauksen avulla, että moottori toimii. Vaihevastusmittaus suoritettiin mittalaitteella Microohmmeter DO5000 Cropicon.

Ehdittiin vielä testata ehjää moottoria, kun staattori kytkettiin tähteen. Itse vikojen aiheutus aloitettiin 18.1.2023.

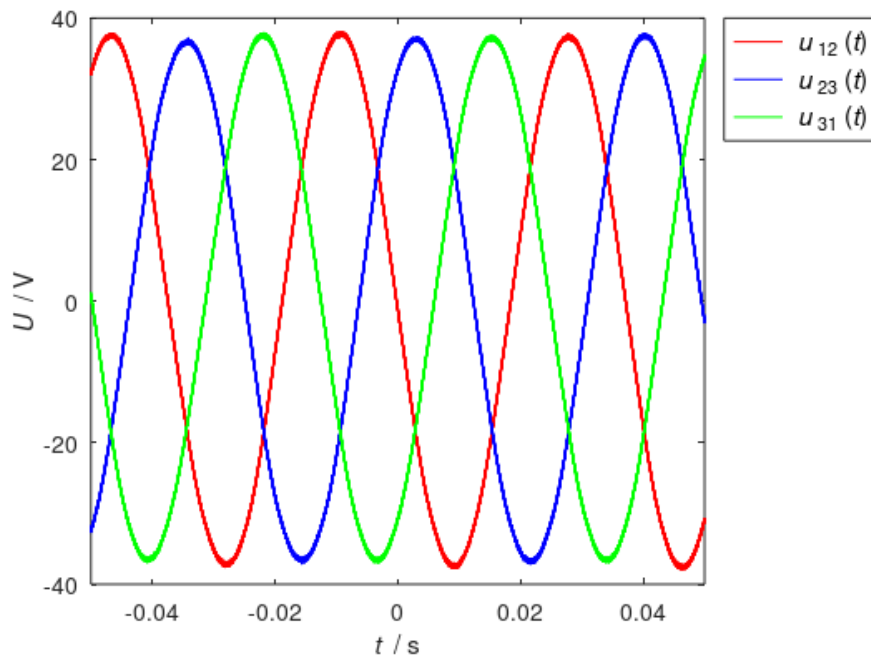
Taulukko 4. Mittaukset päivämäärineen.

Päivämäärä	Mittaukset
17.1.2023	Vaihevastusmittaus Eristysvastusmittaus Vaihejärjestys Ehjä moottori tähtikytkennässä
18.1.2023	Ehjä moottori kolmiokytkennässä Magneetti pois paikoiltaan kolmiokytkennässä Magneetti pois paikoiltaan tähtikytkennässä Magneetti väärinpäin tähtikytkennässä Magneetti väärinpäin kolmiokytkennässä Käämit väärinpäin kahden vaiheen välillä kolmiokytkennässä Käämit väärinpäin kahden vaiheen välillä tähtikytkennässä
19.1.2023	Ilmaraon kasvattaminen, tähtikytkentä Ilmaraon kasvattaminen, kolmiokytkennässä Käämintävirhe, kierroksia viereisessä käämissä Kytkentävirhe terminaalissa U1, W2 Kytkentävirhe terminaalissa U1, U2
22.1.2023	Käämintävirhe, kaksi käämiä ohitettu kolmiokytkennässä Käämintävirhe, kaksi käämiä ohitettu tähtikytkennässä

Alaluvuissa 3.2–3.3, ja pääluvuissa 4–6 on esitetty mittaustuloksia staattorin kolmiokytkennöissä ja tähtikytkennöissä. Mitattavia suureita olivat jännitteet, virrat ja niiden spektrit. Osissa mittauksissa ei ollut eroja kahden eri kytkennän välillä. Jos eroa ei ollut merkittävästi, muissa kuin kytkentöjen luontaisissa eroissa, niiden tulokset on esitetty samoissa alaluvuissa. Roottorivioissa ei ollut merkittävää eroa kytkentöjen välillä, joten ne on esitetty yhdessä alaluvuissa 4.1–4.2. Staattorivioissa ja muissa vioissa eroavaisuuksia havaittiin kytkentöjen välillä, joten vikatilanteet on eroteltu kytkentöjen välillä pääluvuissa 4 ja 6.

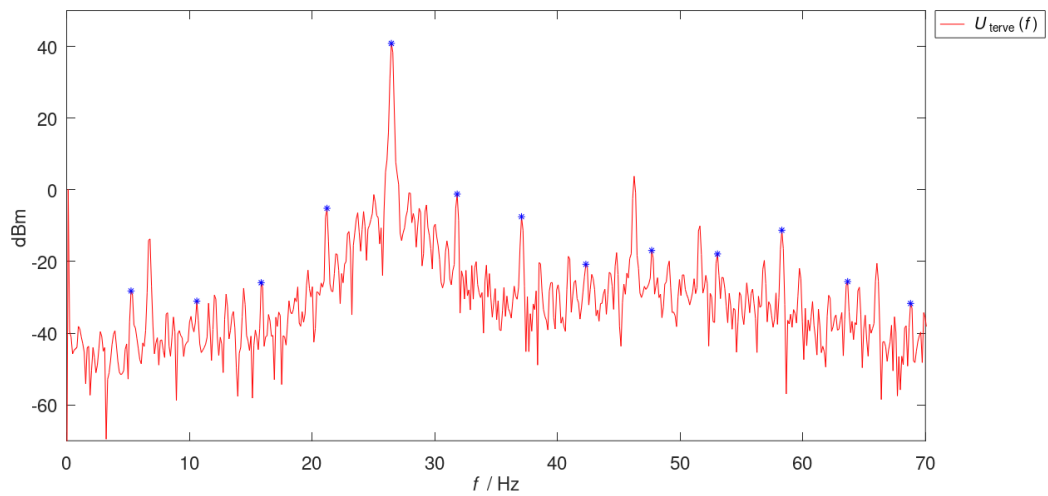
3.2 Ehjä moottori tähtikytkennässä

Alussa kestopagneettimoottoria testattiin tähtikytkennässä. Moottorista mitattiin vaihejännitteet, pääjännitteet, virran sekä vaihejännitteen spektrit. Koska tähtikytkennässä staattoriopiiri on avoimena, siellä ei kulje virtaa. Sen vuoksi seuraavaksi esitetyissä mitaustuloksissa ei ole virran spektrin kuvaajia esitetty. Kuvassa 16 on ehjän moottorin pääjännitteet tähtikytkennässä.



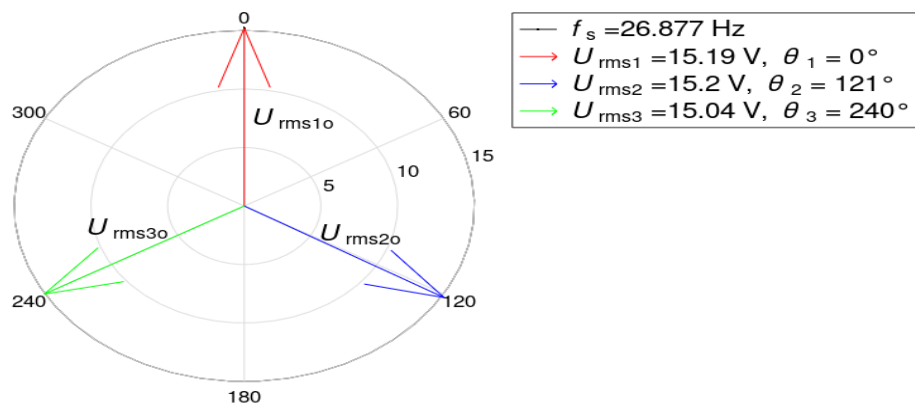
Kuva 16. Ehjän moottorin vaiheiden pääjännitteet vaiheittain tähtikytkennässä.

Kuvassa 17 näkyy liittimille indusoituneen vastajännitteen spektri. Kuten nähdään, vaihejännitteessä näkyy harmonisia komponentteja, jotka tässä tapauksessa ovat pyörimisnopeuden monikertoja. Ideaalisessa koneessa näitä ei ole. Nämä komponentit kyseisessä moottorissa johtuvat moottorin valmistuksesta aiheutuvista epäideaalisuuksista, aiheuttaen epäsymmetriaa roottorin aiheuttamassa magneettivuossa.



Kuva 17. Vastajännitteen taajuusspektri tähtikytkennässä.

Kuvassa 18 on ehjän tähtikytkennän osoitindigrammi. Kuten nähdään, moottorin staatorin käämitys on sinimuotoinen ja epäsymmetria on minimaalista. Pienet erot johtuvat lisäksi akkuporakoneen pyörimisnopeuden epätasaisuudesta.

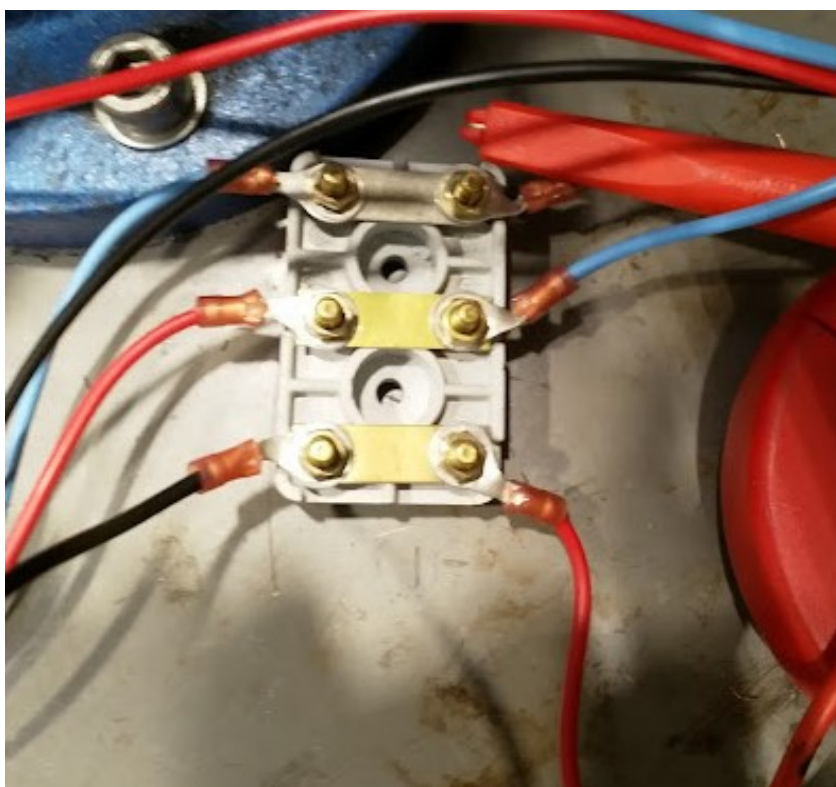


Kuva 18. Ehjän tähtikytkennän osoitindigrammi.

3.3 Ehjä moottori kolmiokytkennässä

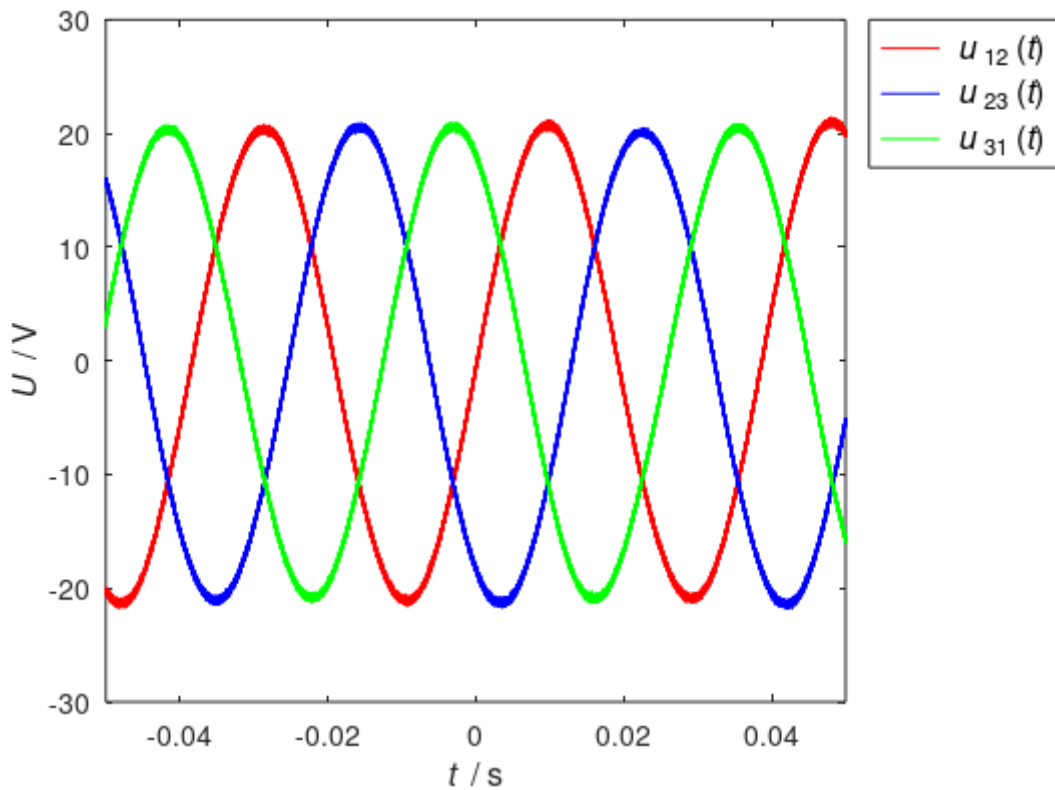
Seuraavaksi staattorikäänitys kytkettiin kolmioon. Staattorikytkentöjen vaihtaminen tähtikytkennästä kolmiokytkentään onnistui helposti kytkentäalustan avulla. Seuraavissa mittaustuloksissa on nyt myös mukana ensimmäisen vaiheen virran kuvaaja sekä virran spektrin kuvaaja.

Kuvassa 19 on mittauksissa apuna ollut kytkentäalusta. Alustalla on mahdollista vaihtaa staattorikäänitys tähtikytkentään ja kolmiokytkentään. Sen lisäksi alustalla voitiin tehdä mielivaltaisia vääriä kytkentöjä, mikä simuloi erästä mahdollista tuotannon aikaista vikaa. Kytkentäalustan musta johto vastaa staattorikäänityksen kolmatta vaihetta, ja vihreää väriä. Vaihejärjestys testatulla moottorilla on tällöin punainen, sininen ja vihreä. Moottoria olisi voitu pyörittää myös toiseen suuntaan.



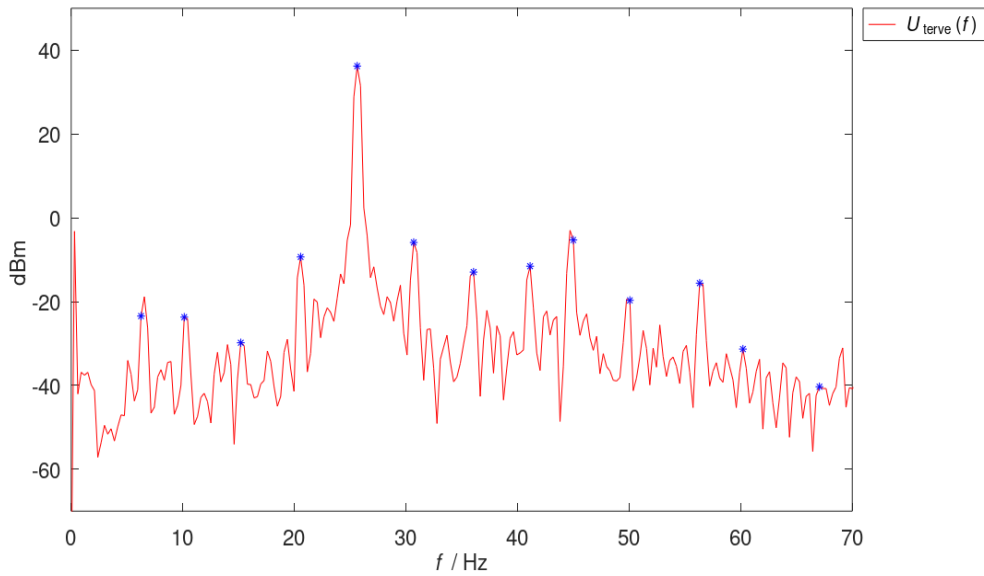
Kuva 19. Kytkentäalusta, staattorikäänitys kolmiokytkennässä.

Kuvassa 20 on kolmiokytkennän pääjännitteet. Jännitteet ovat luontaisesti alemmat kolmiokytkennän vuoksi.



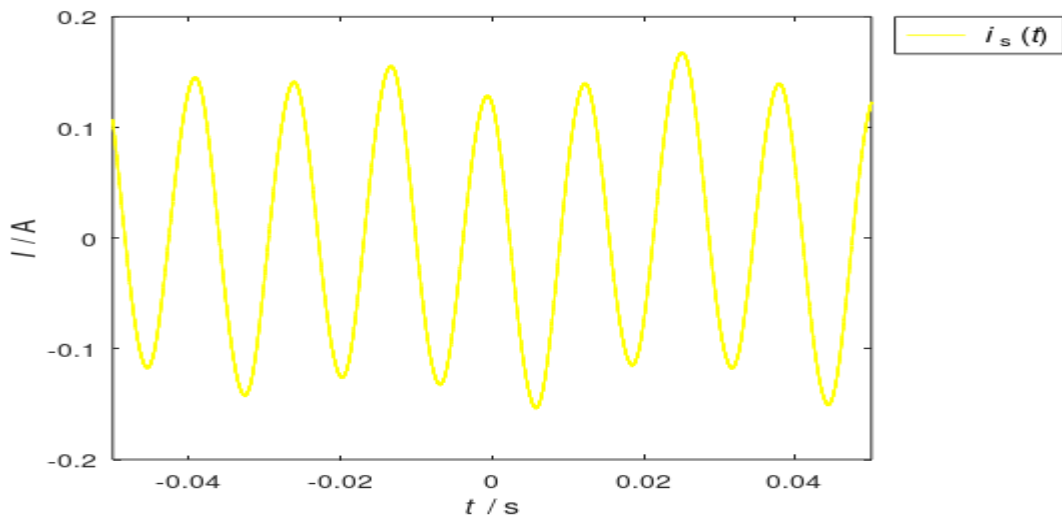
Kuva 20. Kolmiokytkennän pääjännitteet.

Kuvassa 21 on kolmiokytkennän vaihejännitteen spektri. Kuten kuvasta nähdään, samat moottorin valmistusprosessista johtuvat harmoniset komponentit ilmenevät myös kolmiokytkennässä. Staattorin kytkeminen kolmioon ei muuta avaruudellisesti käämien sijaintia, ja sitä kautta epäsymmetriaa. Kytkentöjen spektrien välillä voi mitattaessa kuitenkin olla jonkin verran eroavaisuuksia, sillä osa spektrin pienistä piikeistä johtuu mitauskohinasta.



Kuva 21. Vastajännitteen taajuusspektri kolmiokytkennässä ehjän moottorin tapauksessa.

Kuvassa 22 on staattorivirran spektri kolmiokytkennässä. Ideaalisessa tilanteessa summavirta $i_1 + i_2 + i_3$ on nolla kolmiokytkennässä. Kuitenkin tässä tilanteessa nähdään, että staattorikäämeissä liikkuu hyvin pieni maksimi-amplitudiltaan noin 0,1 mA virta, jonka taajuus on kolminkertainen moottorin sähköiseen taajuuden nähden. Moottoriin indusoituneissa vastajännitteissä on tällöin myös kolmas harmoninen komponentti.



Kuva 22. Virta staattorikäämeissä, kun moottori on kytketty kolmioon.

Vaihejännitteet U_{11} , U_{22} ja U_{33} , joissa on vastajännitteen kolmannesta harmonisesta komponentista johtuva jännite, määritellään

$$U_{11} = U_{1p} \sin(2\pi ft) + U_{1v3h} \sin(3(2\pi ft)) \quad (7)$$

$$U_{22} = U_{2p} \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) + U_{2v3h} \sin\left(3\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (8)$$

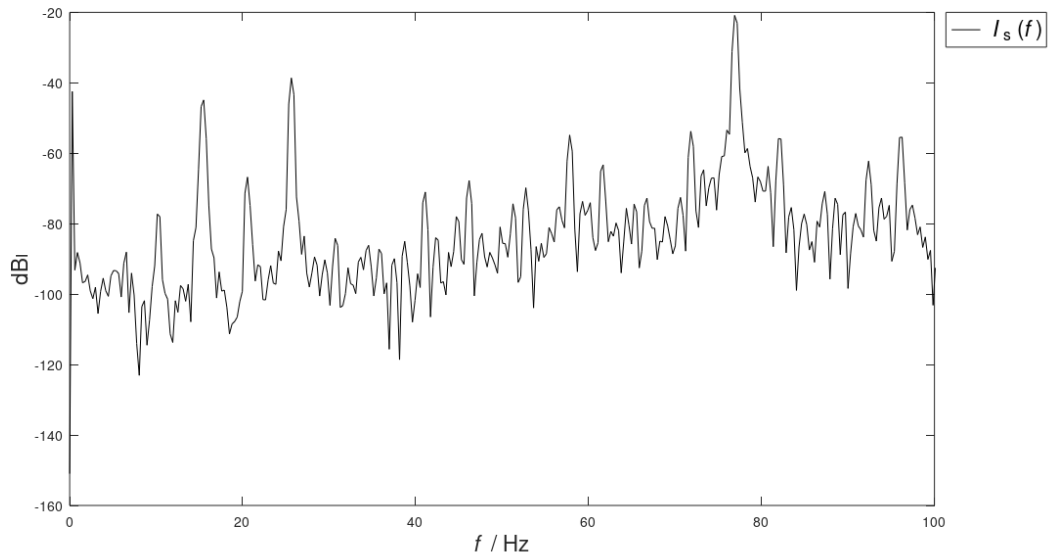
$$U_{33} = U_{3p} \sin\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right) + U_{3v3h} \sin\left(3\left(2\pi ft + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (9)$$

Symmetrisessä kolmivaihejärjestelmässä perustaaajuisten jännitekomponenttien summa on nolla. Tällöin summajännite muodostuu vain harmonisista komponenteista. Kuten yhtälöistä 7–9 nähdään, toisen ja kolmannen vaiheen harmonisten vaihejännitekomponenttien vaihekulmat kolminkertaistuvat. Tällöin esimerkiksi toisen vaiheen harmoniseksi jännitteeksi U_{2vh} saadaan

$$U_{2vh} = U_{2v3h} \sin\left(3\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right)\right) = U_{2v3h} \sin(2\pi 3ft - 2\pi), \quad (10)$$

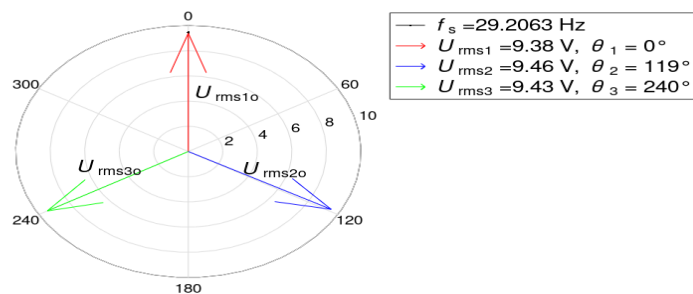
mistä nähdään, että toisen vaiheen kolmas vaihejännitteen harmoninen komponentti on samassa vaiheessa ensimmäisen vaiheen kolmannen harmonisen komponentin kanssa. Sama pätee kolmannen vaiheen kolmannelle harmoniselle komponentille. Tällöin nämä jännitekomponentit eivät kumoakaan toisiaan, vaan summautuvat. Se ilmenee tällöin staattorivirran kolmantena harmonisena komponenttina.

Staattorivirrassa on havaittavissa harmonisia komponentteja, kuten vastajännitteen spektrin tapauksessa kuvassa 21 s. 52. Staattorivirran harmoniset komponentit näkyvät kuvassa 23. Huomion arvoista on juuri sähköisen taajuuden kolmas monikerta, joka on suurin staattorivirran harmoninen komponentti.



Kuva 23. Staattorin vaihevirran spektri.

Kuvassa 24 on kolmiovaihedigrammi kolmiokytkennässä. Kuten nähdään, staattori on symmetrinen. Jännitteet ovat alhaisemmat kuin tähtikytkennässä, mikä on olennaista kolmiokytkennässä.



Kuva 24. Osoitindiagrammi kolmiokytkennässä.

4 Kestomagneettimoottorin roottoriviat

Ensimmäinen testatulle kestopagneettimoottorille aiheutettu vika oli magneetin irrotus roottorista. Kohdeyrityksessä magneetit asetetaan roottoriin käsin, jolloin magneetti voidaan vahingossa asentaa väärinpäin. Tämä aiheuttaa muutoksia kestopagneettimoottorin toiminnassa, mikä näkyy moottorin rutiinikoestuksen aikana. Eroja spektreissä kytkentöjen välillä ei ollut merkittävästi, mistä syystä ne on esitetty samoissa alaluvuissa 4.2–4.3. Spektreissä on verrattu vikatilannetta ehjään tilanteeseen. Ehjän tilanteen spektrit on normalisoitu viallisten tilanteiden taajuuksiin ja amplitudeihin, sillä sähköinen taajuus ei pysynyt samana eri mittaustilanteissa. Sähköiset taajuudet on ilmoitettu osoitindiagrammeissa.

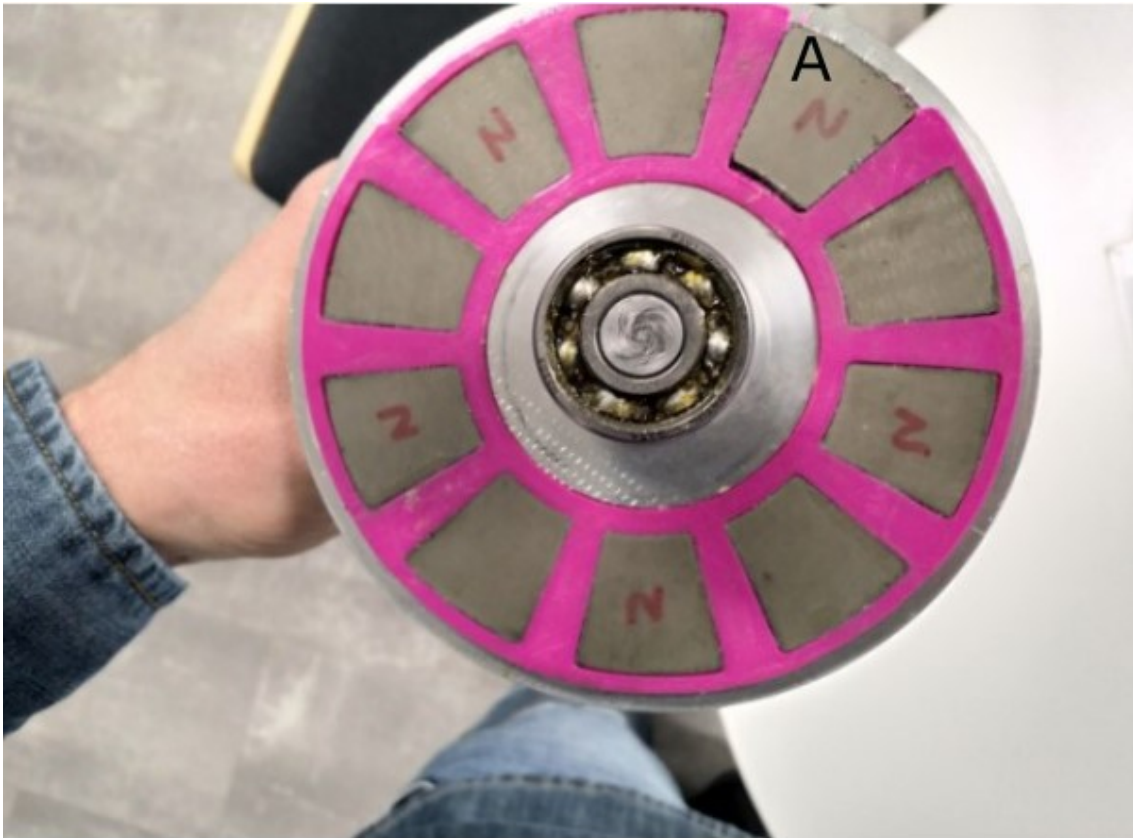
4.1 Magneetti pois paikaltaan kolmio- ja tähtikytkennässä

Zafarani (2018) on väitöskirjassaan tutkinut magneettivikojen vaikutusta kestopagneettimoottorin suoritusarvoihin. Väitöskirjassa on analyttisesti todistettu tiettyjen harmonisten komponenttien olemassaolo jännitespektrissä, joka riippuu käämitystopologiasta ja kestopagneettien määrästä roottorissa. Yleisesti voidaan väitöskirjan perusteella todeta, vikataajuudet f_{vika} voidaan laskea yhtälöstä

$$f_{\text{vika}} = kf_m \quad (11)$$

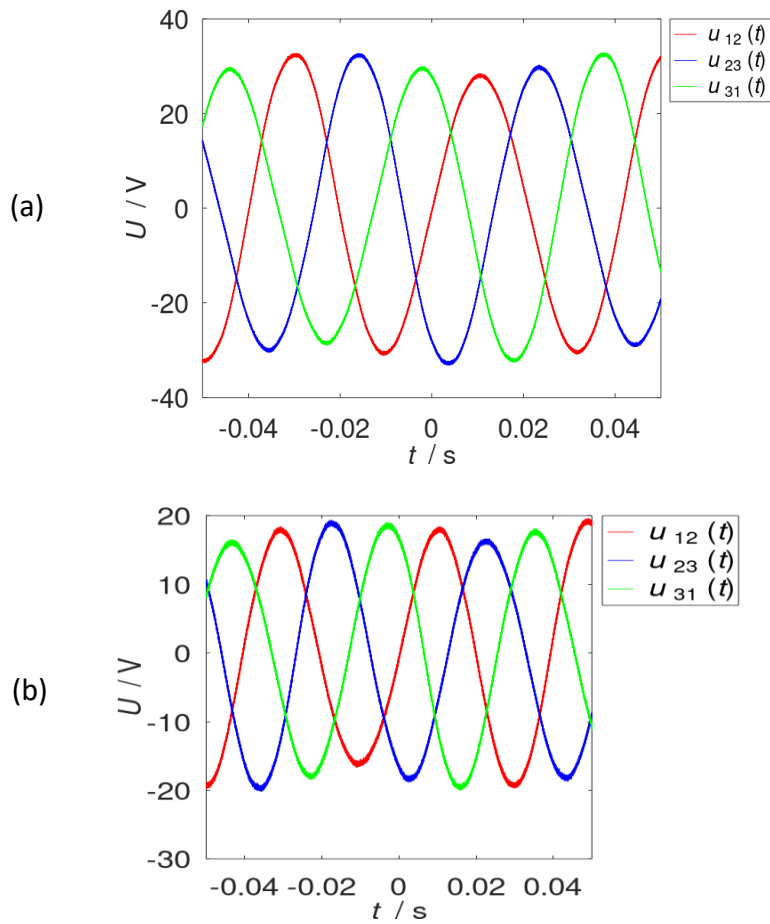
missä f_{vika} on vikataajuus, f_m on roottorin pyörimistaajuus ja k on positiivinen kokonaisluku. Eli roottoriepäsymmetria, mikä voi johtua demagnetoitumisesta tai kolhusta magneetissa, aiheuttaa roottorin pyörimisnopeuden monikertojen ilmentymisen vastajännitespektrin kuvaajassa. Mutta kuten Zafarani on väitöskirjassaan todennut, se, mitkä taajuuden monikerrat moottorin vastajännitespektrissä ilmenevät, riippuu moottorin tyyppistä. Väitöskirjassa on todistettu, että on olemassa kestopagneettimoottoritopologioita, joissa nämä harmoniset komponentit eivät näy jännitespektrissä. Sen lisäksi tietyissä topologioissa virran harmoniset komponentit voivat poiketa vastajännitteen spektrin komponenteista (Zafarani, 2018).

Tässä testissä roottorista irrotettiin yksi magneetti, mikä näkyy kuvassa 25. Magneetin irrotuksen vuoksi magneettivuontiheys tietyn tietyssä staattorikulmassa yhden roottorin pyörähdyksen aikana muuttuu. Ideaalisessa tilanteessa irrotetun magneetin aiheuttama vuontiheyttä ei siis ole ollenkaan, ja tämä ilmenee kerran roottorin pyörähdyksen aikana.



Kuva 25. Roottorista irrotettiin A:lla merkitty kestmagneetti.

Pääjännitteiden muuttuminen molemmissa kytkennöissä magneetin irrotuksen takia käy ilmi kuvasta 26. Magneetin irrotuksesta johtuva roottoriepäsymmetrian kasvaminen aiheuttaa muutoksia jännitteissä.



Kuva 26. Moottorin pääjännitteet, kun magneetti on irrotettu tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).

Magneettivuolle ϕ määritetään (Nasar, 1998, s. 1)

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad (12)$$

missä \mathbf{B} on magneettivuontiheyden vektori, S on alue, jonka läpi magneettivuo menee. Magneetin demagnetoitumisessa tai magneetin irrotuksessa magneettivuo muuttuu. Käämivuolle $\lambda_{\text{käämi}}$ pätee (Krause, 2013, s. 3):

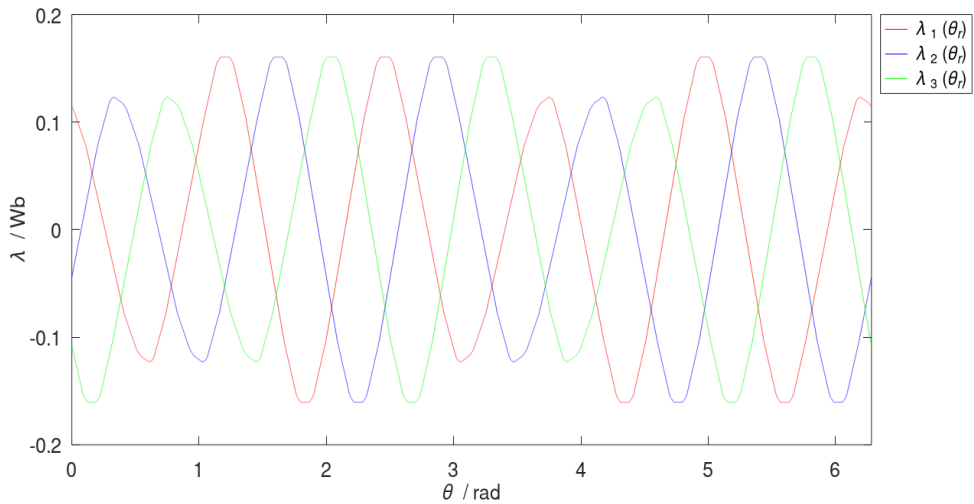
$$\lambda_{\text{käämi}} = N_1 \phi, \quad (13)$$

missä N_1 on käämin kierroslukumäärä ja ϕ on käämin läpäisevä magneettivuo. Kun magneettivuo magneetin irrotuksen takia pienenee, myös käämin käämivuo pienenee. Faradayn lain mukaisesti indusoituneelle jännitteelle yhteen käämiin $e_{\text{käämi}}$ voidaan määrittellä (Zafarani, 2018)

$$e_{\text{käämi}} = \omega_r \frac{d\lambda_{\text{käämi}}}{d\theta_r} \quad (14)$$

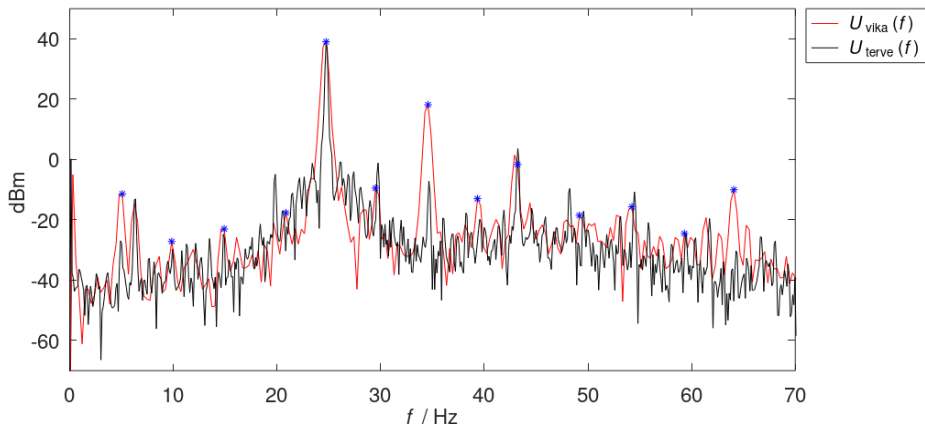
missä $\lambda_{\text{käämi}}$ on yhden käämin käämivuo ja ω_r on roottorin pyörimisnopeus ja θ_r on avaruuskulma radiaaneina. Jos magneetti irrotetaan, on yhden magneetin aiheuttama käämivuo pienempi, ja tällöin myös indusoitunut jännite kyseisen magneetin johdosta on pienempi. Tämä aiheuttaa muutoksia sen vuoksi jännitekuvaajissa, jokaisessa kolmessa vaiheessa. Jos vaiheessa on esimerkiksi neljä käämiä, tämä jännitteen alenema näkyy neljä kertaa yhden jakson aikana.

Kuvassa 27 näkyy laskennallisesti samankaltainen tilanne, kuin kuvassa 39, mutta käämivuon tilanteessa. Jokaisen vaiheen käämivuo alkaa ”huojumaan” magneetin kääntämisen takia. Tämä kertoo harmonisten komponenttien indusoitumisesta käämivuo-ohon. Kuten yhtälöstä 9 on nähtävissä, jännite saadaan derivoimalla käämivuo. Tällöin käämivuossa tapahtuvat ilmiöt näkyvät myös vastajännitteessä.

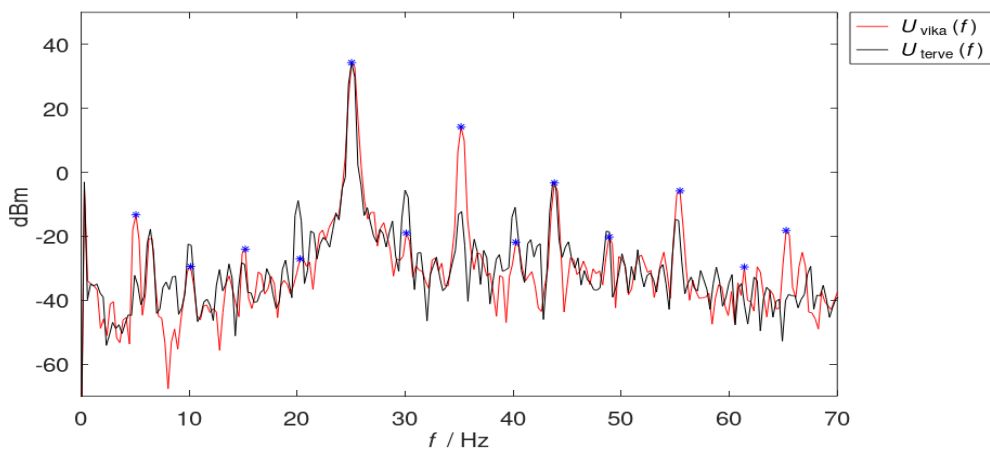


Kuva 27. Tähtikytkennän laskennallinen käämivuo, kun magneetti irrotettu.

Kuten Zafarani on väitöskirjassaan havainnut, pyörimiskertojen monikerrat näkyvät vastajännitespektrissä suurimmissa osissa moottoritopologioita. Tämä myös ilmenee kuvassa 28. On selvästi havaittavissa selvä muutos joissakin parittomissa pyörimisnopeuden komponenteissa. Tässä tapauksessa pyörimisnopeuden ensimmäinen, yhdeksäs sekä kolmastoista monikerta ovat selvästi kasvaneet. Tällöin jännitespektrin monikertojen kasvu on selvä tunniste magneettivialle, myös aksiaalivuokoneen tapauksessa. Koska tähti- tai kolmiokytkentä ei muuta avaruudellisesti käämien asentoa staattorin sisällä, spektri näyttää samalta molemmissa staattorikytkennöissä.



(a)



(b)

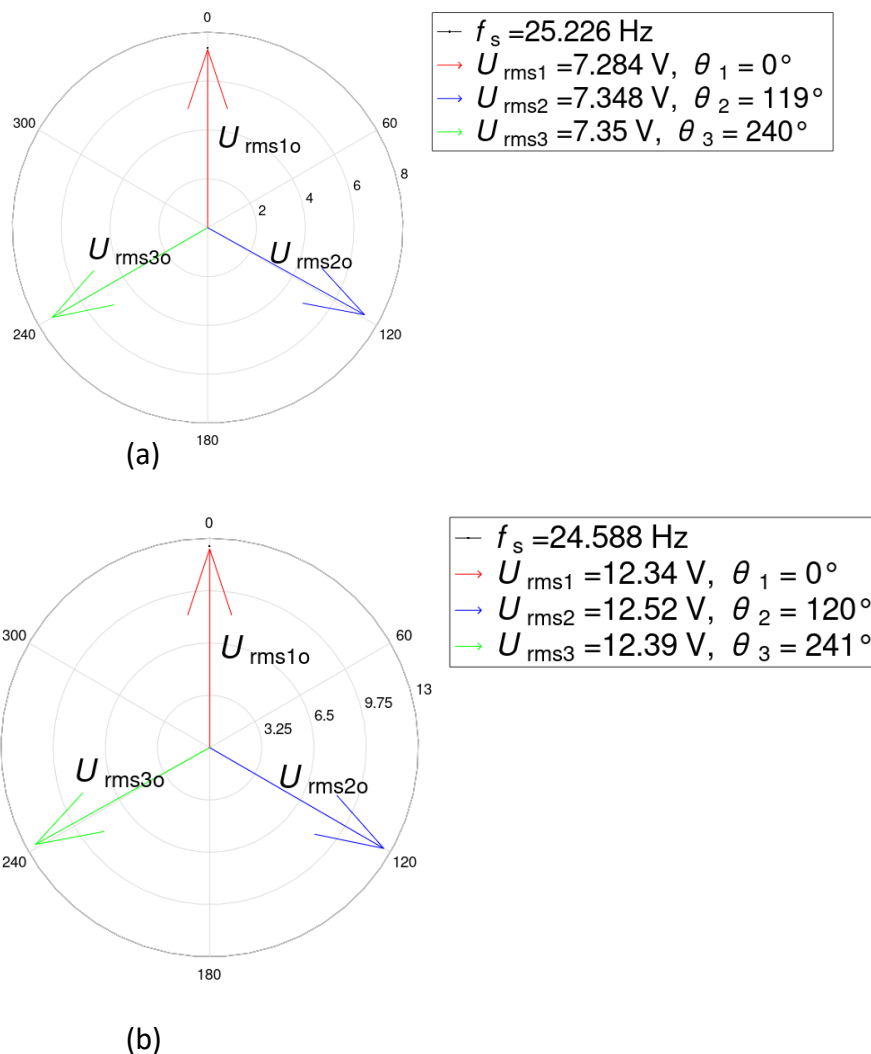
Kuva 28. Magneetin irrottamisen vaikutus vastajännitespektriin, kun ehjä ja viallinen moottori ovat tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).

Taulukossa 5 on vastajännitteen ensimmäiset yhdeksän pyörimisnopeuden monikertaa tähtikytkenän vastajännitespektrille. Taulukon toisella rivillä on esitetty ehjän moottorin jännitespektrin komponenttien suuruudet desibelimilliwatteina. Toisessa sarakkeessa on samat komponentit mutta vikatilanteessa. Kolmannessa sarakkeessa on laskettu näiden komponenttien erotus. Desibelimilliwatti on yksikkö, jossa signaalin tehoa desibeleinä verrataan yhteen milliwattiin (Kosatsky, 2013). Kuten taulukosta nähdään, käytännössä kaikissa ensimmäisessä yhdeksässä monikerrassa näkyy muutoksia. Negatiivista muutosta on havaittavissa komponenteissa neljä ja kuusi. Viides monikerta on moottorin sähköinen taajuus f_s . Negatiiviset muutokset todennäköisesti johtuvat siitä, että magneettiviasta johtuvat harmoniset komponentit ovat eri vaiheessa jo ehjän moottorin valmistuksen epätarkkuudesta johtuvien harmonisten komponenttien kanssa. Tämä selittää, miksi muutosta moottorin harmonisten komponenttien suuruudessa tapahtuu, siis joko negatiiviseen tai positiiviseen suuntaan. Pienet muutokset tilanteiden välillä selittyvät myös mittauskohinasta.

Taulukko 5. Vastajännitteen spektrin ensimmäiset yhdeksän pyörimisnopeuden monikertaa ehjässä tilanteessa, ja magneettivian aikana.

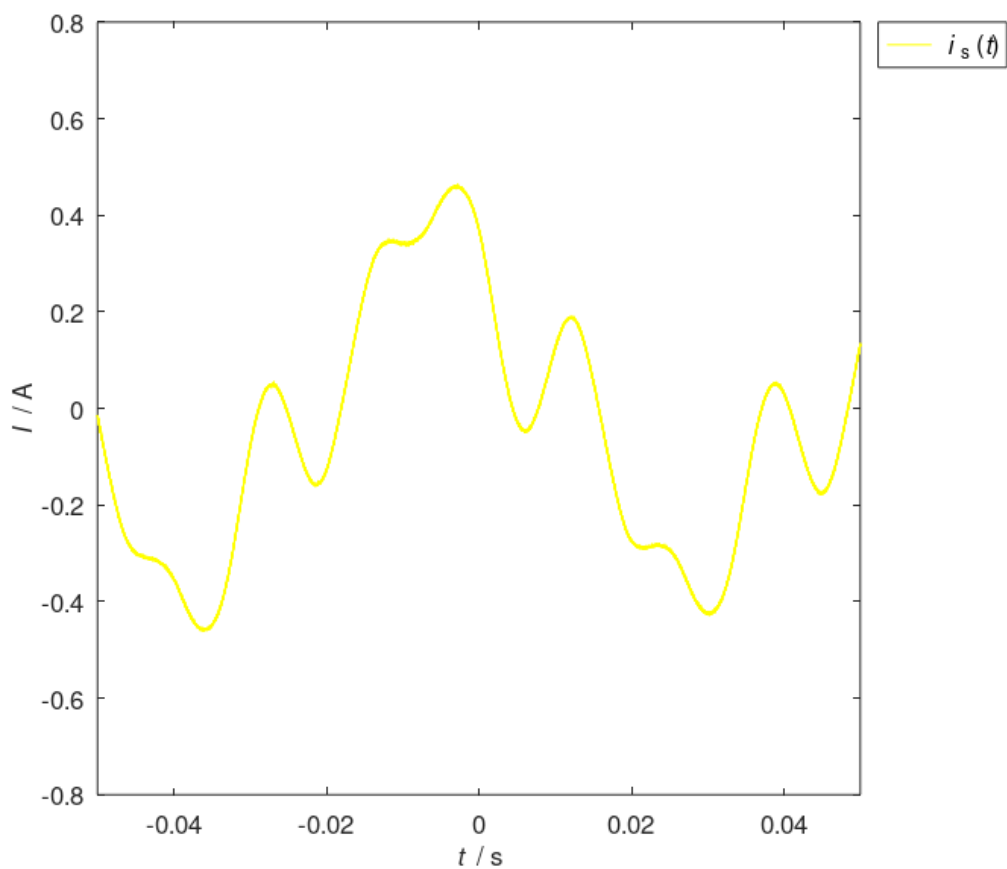
n	1	2	3	4	5 eli f_s	6	7	8	9
dbm1	-28,20	-31,04	-25,9	-5,14	40,85	-1,18	-7,50	-20,8	-16,91
dbm2	-4,25	-20,53	-20,5	-11,0	36,99	-17,4	23,92	-12,6	-4,46
dbm2- dbm1	23,96	10,51	5,376	-5,80	-3,86	-16,2	31,42	8,14	12,45

Kuvassa 29 on moottorin vaihejännitteet, kun magneetti on irrotettu roottorista. Vaikka roottorissa oleva vika aiheuttaa epäsymmetriaa indusoituneissa vastajännitteissä, tämä sama vika kuitenkin tulee jokaisen vaiheen indusoituneille vastajännitteille. Tällöin vikaa ei näy osoitindiagrammissa. On kuitenkin huomattava, että kuten kuvassa 18 s. 49 havaitaan, staattorikäämit eivät ole täysin symmetriset. Tällöin tietyt harmoniset kompensoituvat eri lailla eri vaiheiden välillä. Tällöin myös osoitindiagrammissa voi olla pieni ero. Mutta kuten kuvasta 29 ilmenee, tämä ero on käytännössä niin mitätön, että se menee mittaustoleranssin alle.



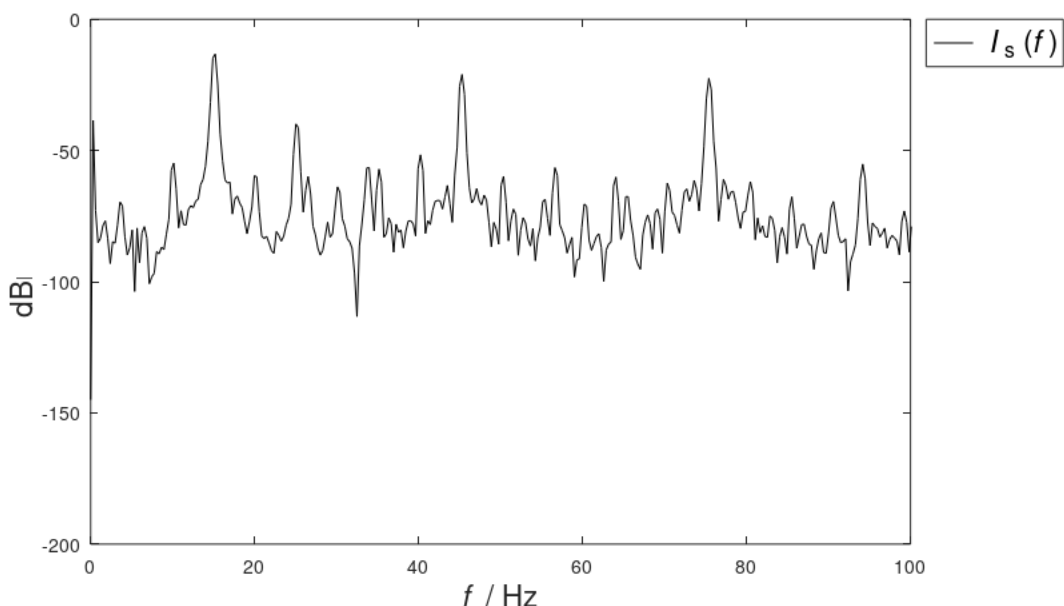
Kuva 29. Osoitindiagrammi magneetin irrotuksen jälkeen kolmiokytkennässä (a) ja tähtikytkennässä (b).

Magneetin irrotuksen jälkeinen staattorikämeissä kulkeva virta kolmiokytkennässä näkyy kuvassa 30. On mielenkiintoista havaita virran kasvu sekä selvä muutos kolmiokytkentään, jossa moottori oli ehjä. Staattorin virran perustaajuus nimittäin ei ole enää kolminkertainen sähköiseen taajuuteen verrattuna, kuten oli ehjässä tapauksessa kolmiokytkennässä.



Kuva 30. Staattorivirta magneetin irrotuksen takia kolmiokytkennässä.

Kuvassa 31 nähtävissä virran spektri magneetin irrotuksen jälkeen. On havaittavissa selvä muutos virran pyörimisnopeuden kolmannen monikerran komponentissa, joka on kasvanut suhteessa ehjän kolmiokytkennän muihin komponentteihin. Koska todennäköisimmin eri vaiheiden staattorikäymysten välillä on valmistuksesta johtuvaa epäsymmetriaa, roottoriepäymmetriasta johtuvat harmoniset komponentit ovat eri suuruisia vaiheiden välillä. Tällöin osa vaiheista pystyy paremmin nollaamaan magneettiviasta johtuvat harmoniset komponentit. Tärkeintä on kuitenkin havaita pyörimisnopeuden monikertojen kasvaminen myös virtaspektrissä. On kuitenkin tapauksia, kun magneettiviasta aiheutuvat taajuuskomponentit eivät näy virran taajuusspektrissä, mutta näkyvät vastajännitespektrissä (Zafarani, 2018)

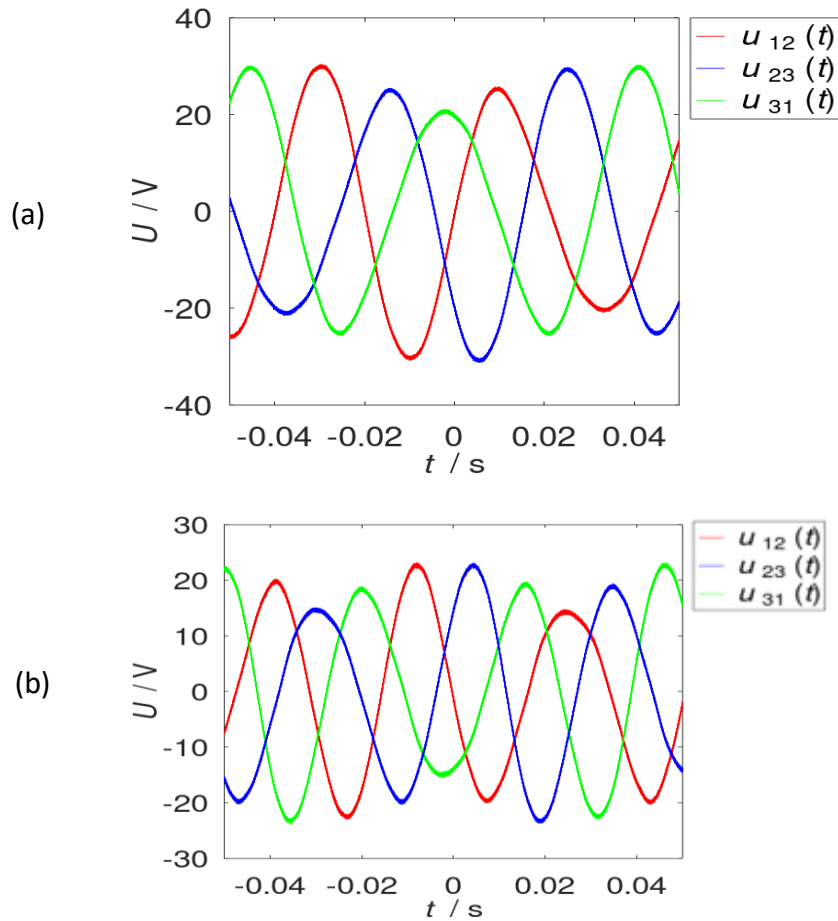


Kuva 31. Virran taajuusspektri magneetin irrotuksen vuoksi kolmiokytkennässä.

4.2 Magneetti väärinpäin kolmiokytkennässä ja tähtikytkennässä

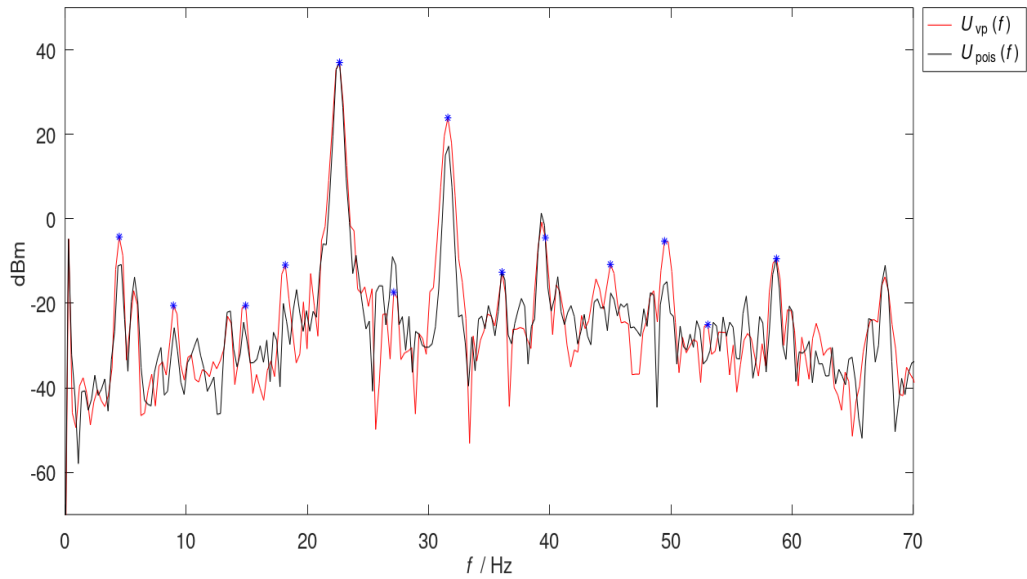
Seuraavana testijärjestelynä irrotettu magneetti laitettiin takaisin paikalleen, mutta tällä kertaa väärinpäin. Oletuksena on, että väärinpäin käännetty magneetti aiheuttaa epäsymmetriaa vastajännitespektrissä kuten edellisissä mittauksissa, mutta eri suuruisena.

Magneetin kääntäminen aiheuttaa pääjännitteissä selvempää muutosta, joka ilmenee kuvasta 32. Voidaankin todeta, että magneetin kääntäminen väärinpäin aiheuttaa suuremman muutoksen vastajännitteissä.



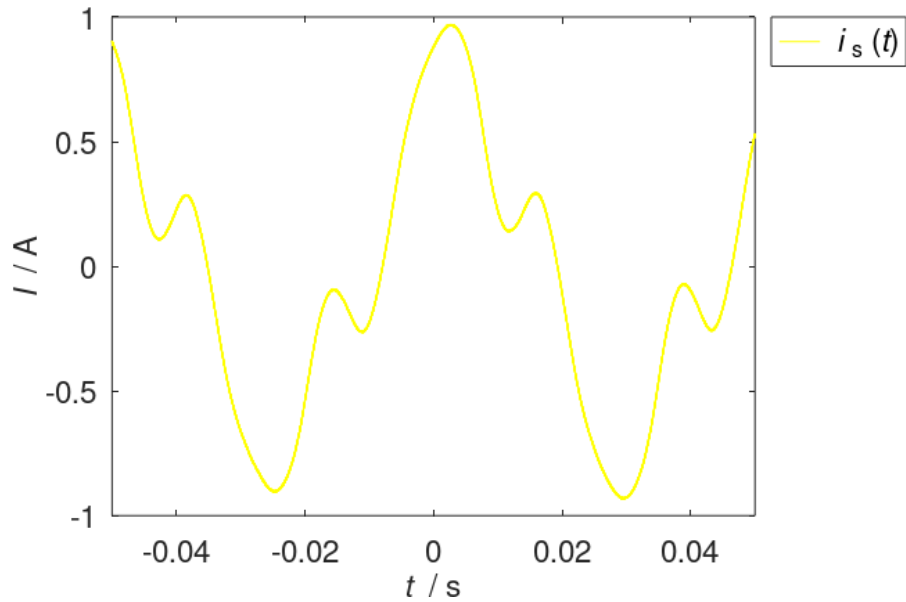
Kuva 32. Pääjännitteet tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b), kun magneetti on käännetty väärinpäin.

Verrataan esillä olleiden tapausten vastajännitespektrejä tähtikytkennässä. Kuten nähdään, magneettivioilla on eroja, mikä näkyy kuvassa 33. Selvästi pyörimistaajuuden monikerrat, kuten seitsemäs monikerta, kasvavat kun magneetti on käännetty väärinpäin. Magneetin kääntäminen väärinpäin tällöin siis aiheuttaa suurempaa epäsymmetriaa kuin magneetin irrotus.



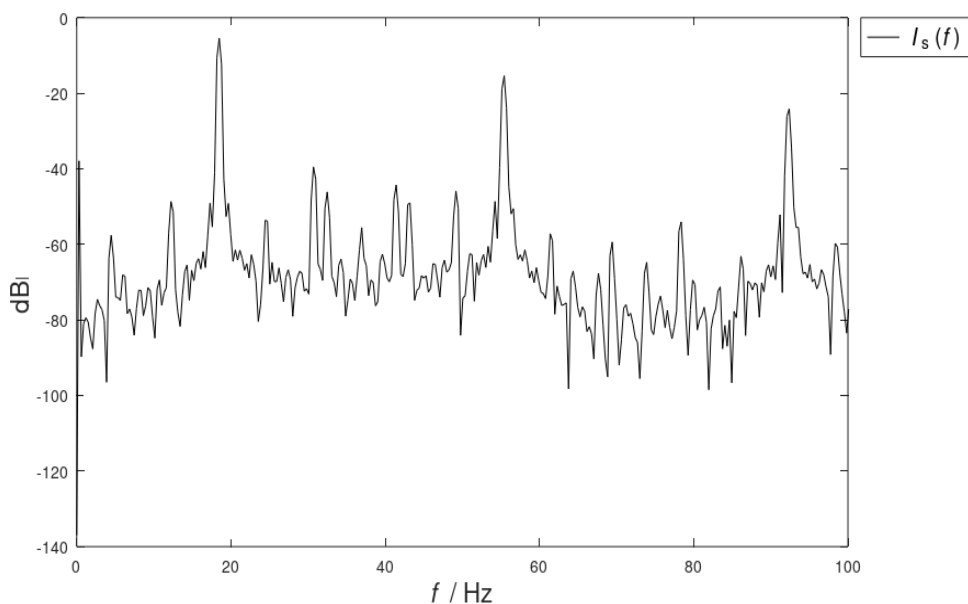
Kuva 33. Vastajännitespektri tähtikytkennässä, kun magneetti on joko irrotettu tai laitettu väärinpäin.

Kuvassa 34 on staattorivirta, kun magneetti on käännetty väärinpäin. Käämien luonnollinen epäsymmetria voi aiheuttaa jälleen sen, että induktiovirtaa syntyy kolmiokytkenään.



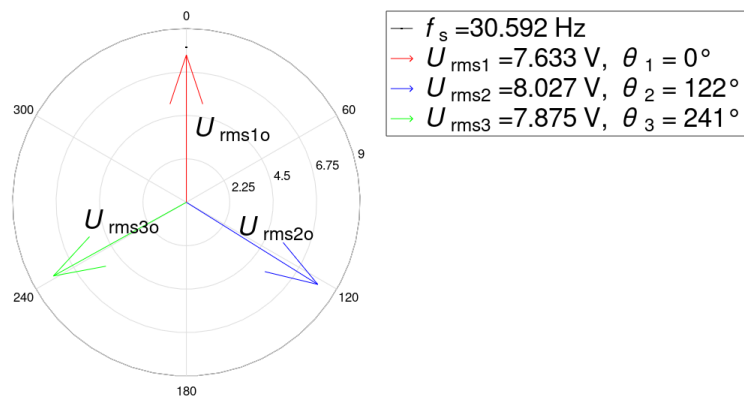
Kuva 34. Kolmiokytkenän staattorivirta, kun magneetti on käännetty väärinpäin kolmiokytkenässä.

Kuvassa 35 ilmenee, että staattorivirran pyörimisnopeuden kolmannen harmonisen monikerran komponentin kasvu on merkittävin ehjään tilanteeseen nähden. Tämä johtuu todennäköisimmin kyseessä olevan staattorin luontaisesta epäsymmetriasta, ja vaiheiden kyvyllä kompensoida magneettiviasta johtuvia harmonisia komponentteja on eroavaisuuksia. Muitakin pyörimisnopeuden monikertoja on myös nähtävissä. Vastajännitteiden summassa perustajuisten harmonisten komponenttien summa on nolla, mutta osa pyörimisnopeuden monikerroista voi summautua vaiheiden välillä. Sen vuoksi pyörimisnopeuden monikertoja on spektrissä nähtävissä, vaikka virrassa ei ole sähköisen taajuuden komponenttia.

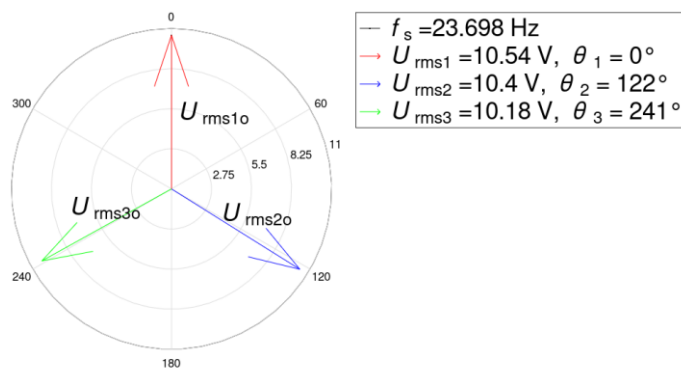


Kuva 35. Kolmiokytkennän virran spektri, kun magneetti käännetty väärinpäin.

Magneetin kääntäminen väärinpäin ei aiheuta suuria muutoksia vaihejännitteiden suuruuksissa vaiheiden välillä. Tämä huomataan kuvasta 36. Staattorisymmetria säilyy tässäkin viassa, jolloin osoitindiagrammin symmetria pysyy samana. On kuitenkin havaittava selvä jännitteen laskeminen, jokaisella vaiheella. Magneetin kääntäminen väärinpäin aiheuttaaakin vastakkaisen jännitteen jokaiseen vaihekäämiin, verrattuna ehjään tilanteeseen. Siinä tapauksessa se laskee kokonaista käämien yhteenlaskettua summajännitettä. On myös tärkeää huomata, että pieni epäsymmetriaa on myös jännitteissä. Kuten voitiin todeta kuvasta 18 s. 49, staattorien vaihekäämit ovat tässä moottorissa luonnollisesti hieman epäsymmetriset. Tämä voi aiheuttaa pientä epäsuuruutta indusoitu-neissa jännitteissä vaiheiden välillä magneettivian tapauksessa. Tämä ero ei kuitenkaan ole merkittävä.



(a)



(b)

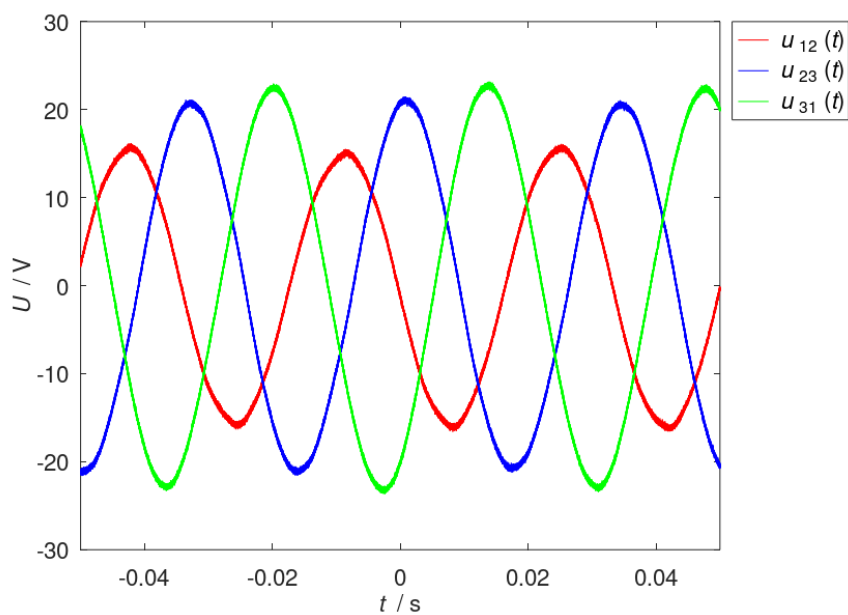
Kuva 36. Vaihejännitteiden osoitindiagrammi, kun magneetti on väärinpäin kolmiokytkennässä (a) ja tähtikytkennässä (b).

5 Kestomagneettimoottorin staattoriviat

Seuraavaksi aiheutettiin vikoja staattorikäimitykselle. Tässä testissä havaittiin eroja kolmio- ja tähtikytkennän välillä. Tästä syystä ne on esitetty erillisissä alaluvuissaan. Alaluvuissa 5.1 ja 5.3 ovat staattorikäimityksen viat kolmiokytkennässä, ja alaluvuissa 5.2 ja 5.4 ovat viat tähtikytkennässä. Ideaalissa tilanteessa moottori suunnitellaan siten, että staattorikäimitys on symmetrinen ja sinimuotoinen, jolloin käämityksen muuttaminen aiheuttaa muutosta tähän ideaaliin toimintaan. Tällöin on mahdollista, että muutos näkyy osoitindiagrammissa.

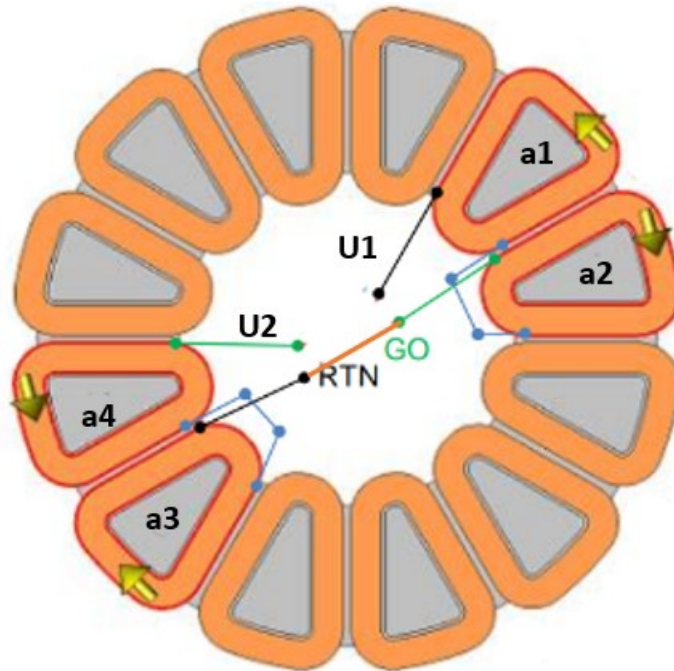
5.1 Testi, jossa staattori on käämitty väärin kahden vaiheen välillä kolmiokytkennässä

Pääjännitteet, kun kaksi käämiä on vaihtanut paikkaa kahden käämin välillä, on esitetty kuvassa 37. On nähtävissä selvä ero pääjännitteissä, sillä käämien vaihto kahden vaiheen välillä aiheuttaa muutoksia keskinäisinduktansseissa sekä vaiheiden U ja V vastajännitteissä.



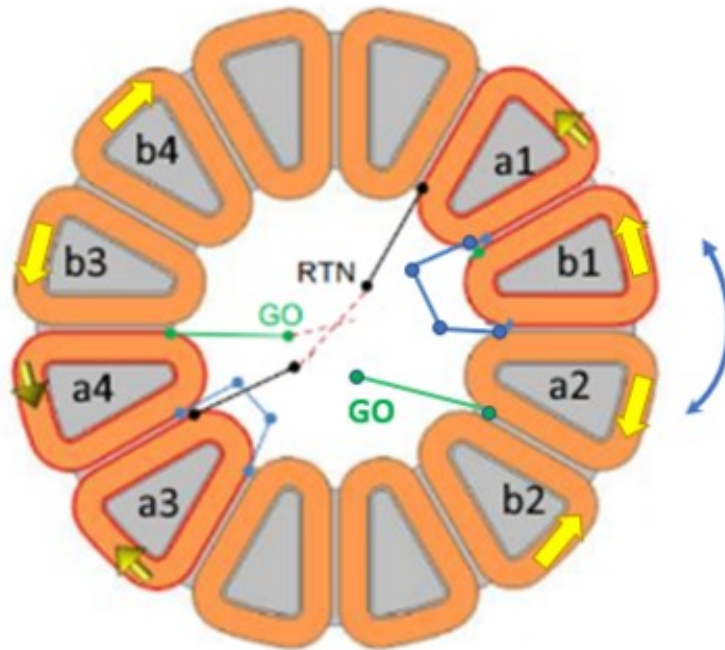
Kuva 37. Pääjännitteet testissä, jossa kaksi staattorikäämiä on väärinpäin kolmiokytkennässä.

Kuvassa 38 on vaiheen kytkentä. Kuten nähdään, käämit on punottu vastakkaisiin suuntiin, jotta on mahdollista saada maksimijännite. Tämä onkin kestopagneettimoottorin olennainen toimintaperiaate.



Kuva 38. Moottorin U-vaihe kytkettynä oikein (Jordan, 2018, mukaillen).

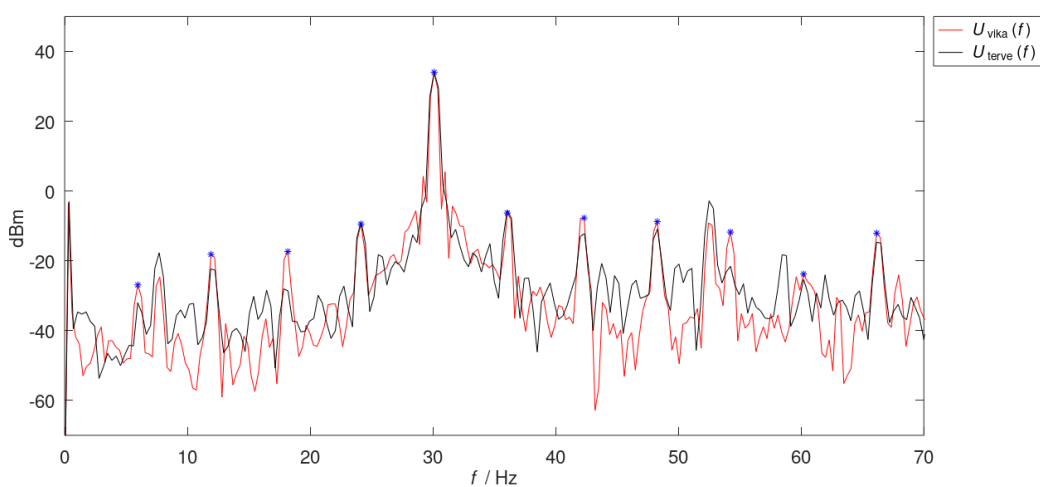
Kuten kuvassa 39 näkyy, käämien vaihtaessa paikkaa, moottorin U- ja V-vaiheiden käämijakauma ei ole enää symmetrinen. Tämä ei ole optimaalinen käämijakauma. Sen lisäksi tätä kytkentää ei ole W-vaiheessa. Tämä johtaa automaattisesti vastajännite-epäsymmetriaan vaiheiden välillä.



(b)

Kuva 39. KytKentä, kun U- ja V vaiheen käämit ristissä (Jordan, 2018, mukaillen).

Kuvassa 40 on verrattu ehjän kolmiokytkennän spektriä, sekä spektriä kun kaksi käämiä on vaihtanut paikkaa kahden vaiheen välillä. Kuten nähdään, spektreissä on eroa myös tässä tapauksessa, ja pyörimisnopeuden komponenttien suuruusluokat poikkeavat hie- man toisistaan eri näissä kahdessa tilanteessa. Esimerkiksi kymmenes ja kahdestoista pyörimisnopeuden monikerta ovat kasvaneet. On kuitenkin huomattava, että verrattuna magneettivikaan, spektriin ei ilmesty suuria harmonisia komponentteja, kuten esimer- kiksi seitsemännen monikerran komponenttia magneettivian tapauksessa.

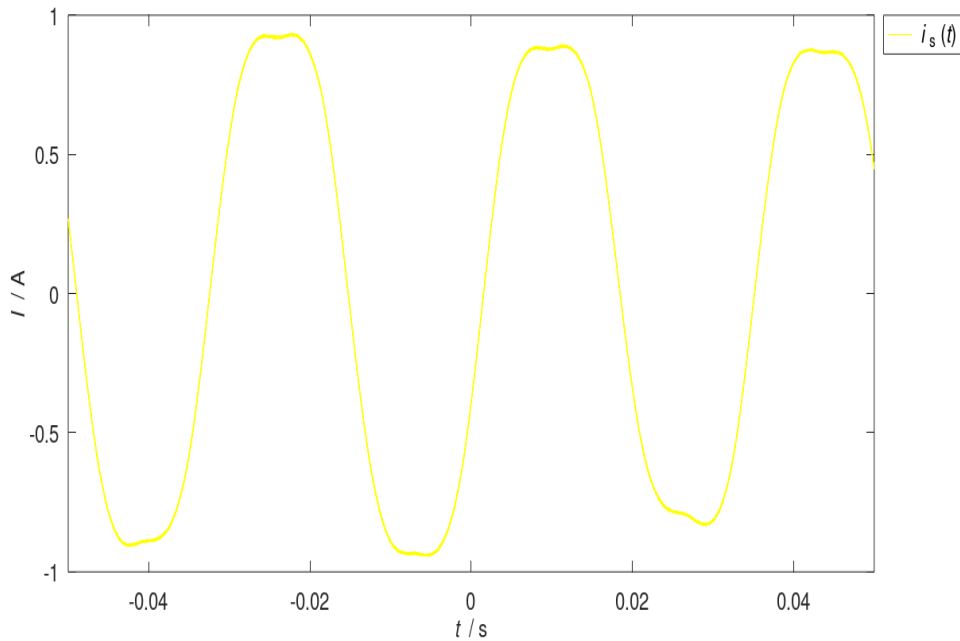


Kuva 40. Vastajännitteen taajuusspektrien vertailu, kun kaksi käämiä on väärinpäin kolmiokytkennässä ja ehjän moottorin tapauksessa.

Kuten kuvasta 41 nähdään, kolmiokytkentään muodostuu induktiovirta, jonka taajuus on vastajännitteen sähköinen taajuus. Tämä selittyy sillä, että nyt vaiheet ovat epäsymmetriset. Tämä johtaa siihen, että vaihejännitteiden summa

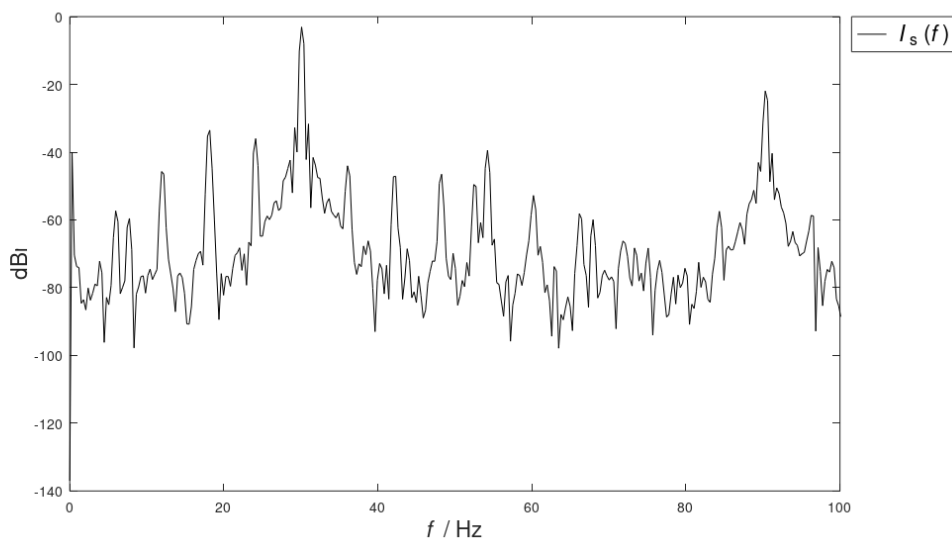
$$U_{11} + U_{22} + U_{33} \neq 0, \quad (10)$$

missä U_{11} on ensimmäisen vaiheen vaihejännite, U_{22} on toisen vaiheen vaihejännite ja U_{33} on kolmannen vaiheen vaihejännite. Tämä johtaa siihen, että käämien välillä nyt induktion kautta kolmannen sähköisen taajuuden monikerran lisäksi perustaajuinen virta.



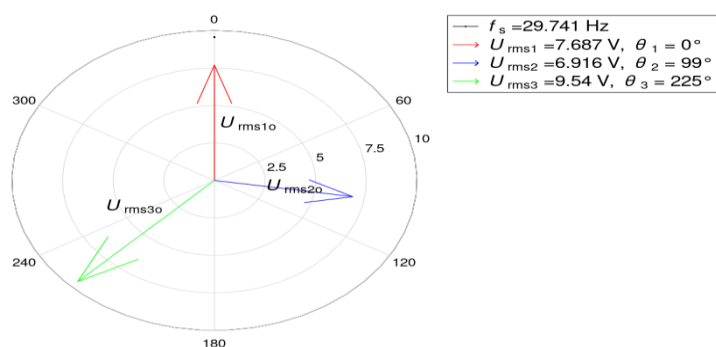
Kuva 41. Kolmiokytkennän virta, kun kaksi käämiä on väärinpäin.

Kuvassa 42 on induktion kautta muodostunut staattorivirta käämeihin. Kuten nähdään, virran suurin komponentti on samalla taajuudella kuin sähköinen taajuus. On havaittavissa virtakomponentti myös sähköisen taajuuden kolmannessa monikerrassa.



Kuva 42. Kolmiokytkennän staattorivirran spektri, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin.

Tässä nähtiin nyt ensimmäiset selvät muutokset osoitindiagrammissa. Muutos on havaittavissa kuvasta 43.



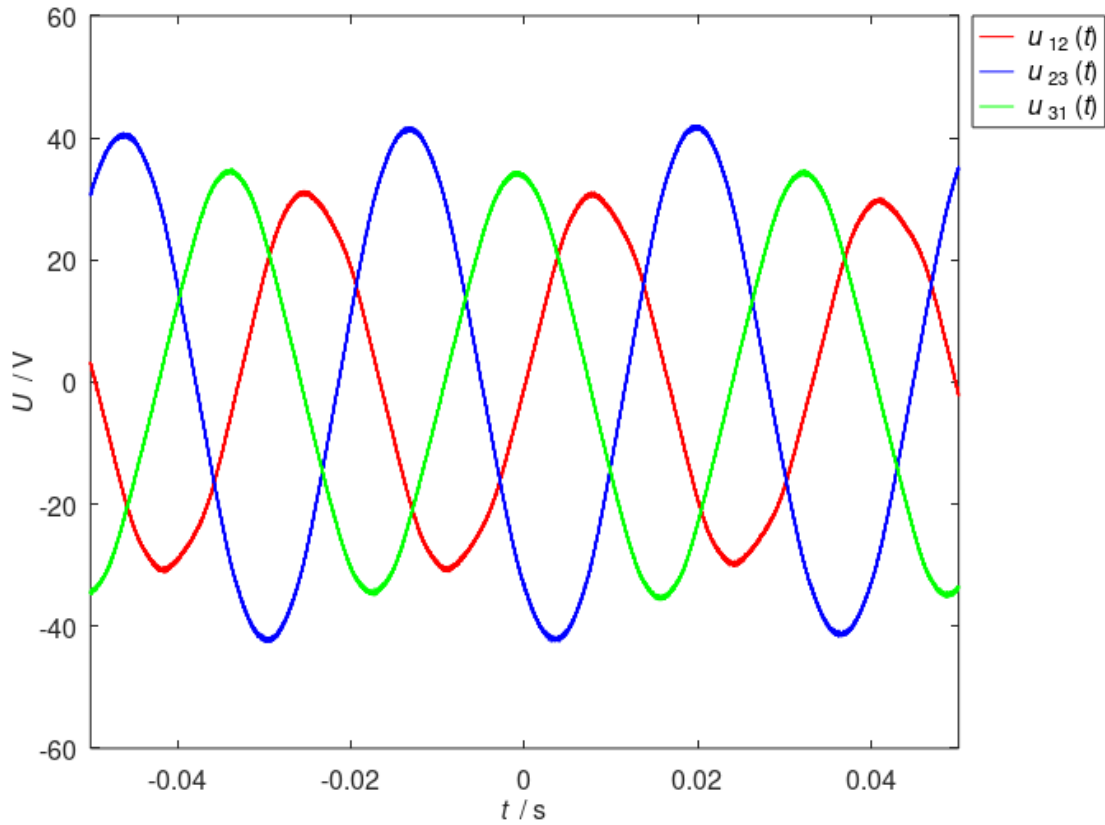
Kuva 43. Osoitindiagrammi, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin kolmiokytkennässä.

Tämä johtuu käytännössä ensimmäisen ja toisen vaiheen jännitteenalenemista käämi-muutoksen jälkeen. Sen lisäksi, kolmiokytkenässä kulkee nyt virta. Tällöin tapahtuu induktiivinen kytkeytyminen. Yhtälössä 5 s. 42 on määritelty U vaiheen vaihejännite U_{11} . Vaiheiden kytkeminen eri tavalla, tässä tapauksessa kaksi käämiä väärinpäin, muuttaa U-vaiheen induktanssia L_{11} , ja keskinäisinduktansseja M_{12} , M_{13} . Muutokset näissä samoissa suureissa tapahtuvat myös V vaiheessa. Tällöin staattorin käämityksen muuttaminen vaikuttaa vahvasti vaiheiden väliseen kytkeytymiseen.

Kuten kuvasta 43 on havaittavissa, vaiheiden U ja V välillä keskinäinen induktiivinen kytkeytyminen on erittäin vahvaa. Tämä selittyy sillä, että käännetty käämi oli viereinen V-vaiheen käämin kanssa. Nyt indusoitunut magneettivuo käännettyssä käämissä liikkuu eri suuntaan, tässä tapauksessa heikentäen V vaiheen käämiin indusoitunutta jännitettä. Vaiheen V jännite onkin jopa pienempi kuin vaiheen U jännite, jossa tähtikytkenässä oli pienin vaihejännite.

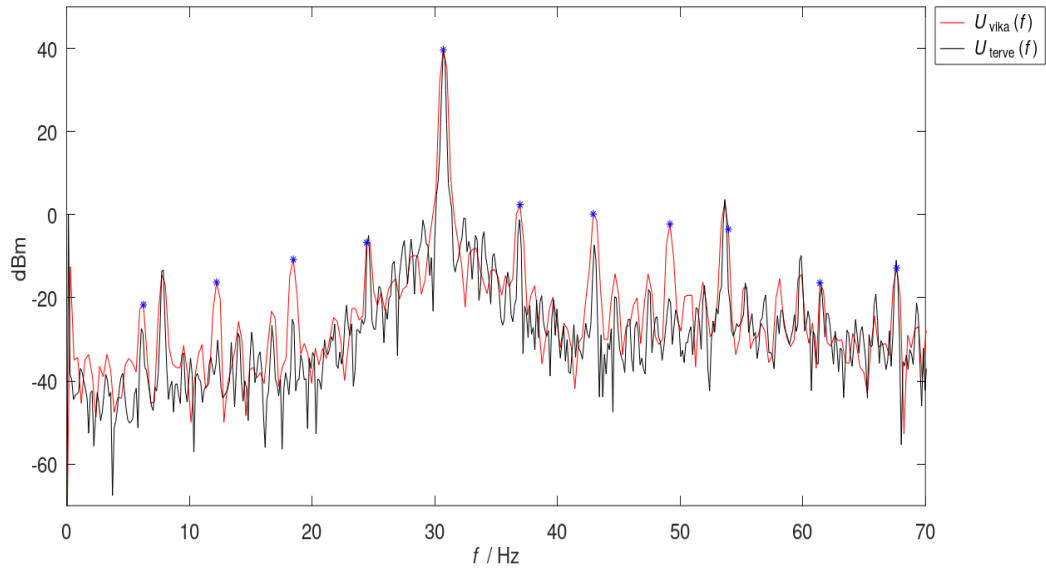
5.2 Testi, jossa staattori on käämitty väärin kahden vaiheen välillä tähtikytkennässä

Kuvassa 44 on pääjännitteet, kun staattori on käämitty väärin kahden vaiheen välillä tähtikytkennässä. Pääjännitteissä on selvästi eroa ehjään tilanteeseen nähden.



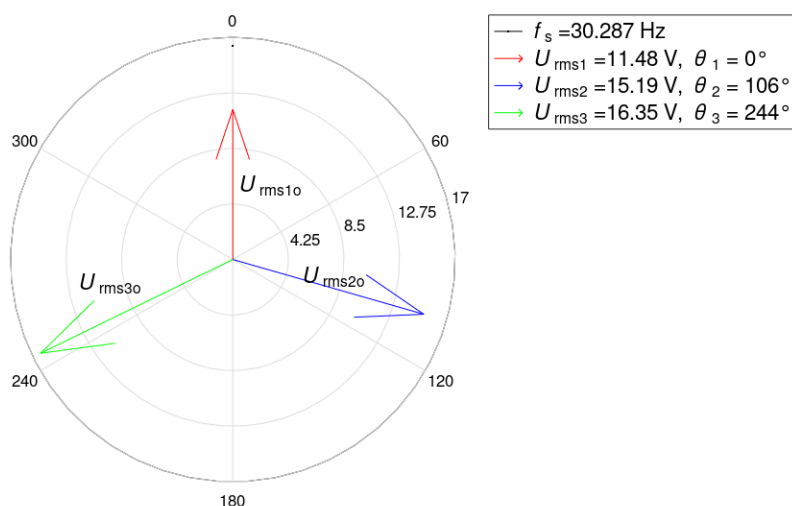
Kuva 44. Pääjännitteet tähtikytkennässä, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin.

Samat ilmiöt kuin kolmiokytkennän käämin käännön jälkeen on havaittavissa kuvassa 45. Harmonisia komponentteja on ilmentynyt hieman ehjään tilanteeseen nähden. Esimerkiksi pyörimisnopeuden toinen, kolmas ja kahdeksas monikerta ovat kasvaneet.



Kuva 45. Vastajännitteen taajuusspektri tilanteissa, kun kaksi käämiä on käännetty väärinpäin ja kun moottori on ehjä tähtikytkennässä.

Tässä testissä on tehty vika vaiheen U ja vaiheen V välillä. Kun tähtikytkennässä ei virtaa staattorikämeissä kulje, vaihejännite U_{11} tähtikytkennässä on yhtälön 6 s. 42 kaltainen. Tällöin kun induktiivista kytkeytymistä ei tapahdu, voidaan tarkastella pelkästään vastajännitekomponenttia. Testattava vika pitäisi näkyä osoitindiagrammissa U- ja V-vaiheiden jännitteissä ja vaihekulmissa. Tämä havaitaan kuvasta 46. Vaiheessa U on suurempi jännitteen alenema, kuin vaiheessa V. Tämä johtuu siitä, että nyt U-vaiheeseen lisättyyn käämiin V-vaiheesta indusoituu vastakkainen jännite alkuperäiseen U-vaiheen käämiin verrattuna. V-vaiheeseen siirrettyyn käämiin U-vaiheesta indusoituu samansuuntainen jännite. Tällöin vialliseen V-vaiheeseen indusoitunut vastajännite on vain yhden voltin pienempi, kuin ehjässä W-vaiheessa.

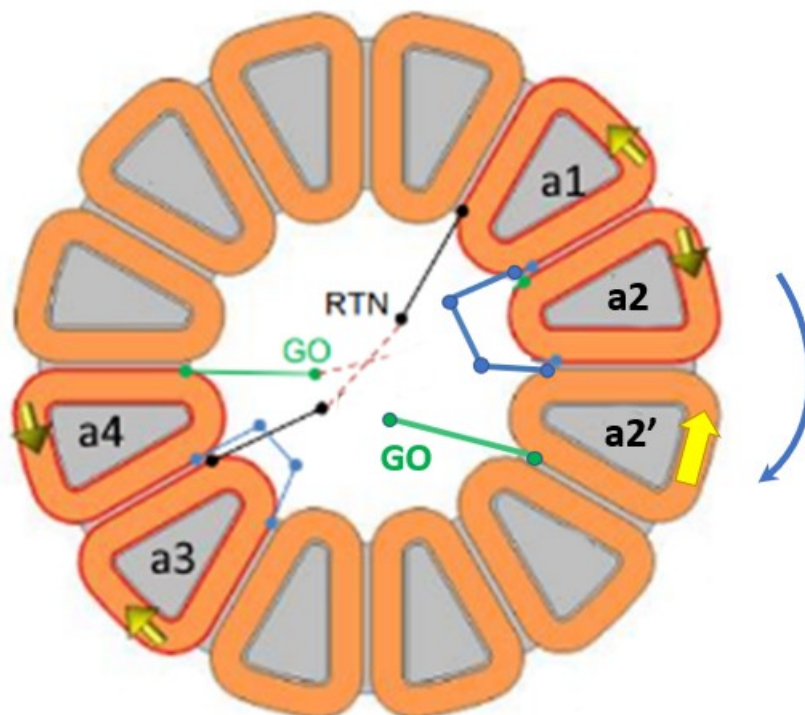


Kuva 46. Jännitteen osoitindiagrammi tilanteessa, kaksi käämiä on kytketty väärinpäin tähtikytkennässä.

5.3 Käämiä viereisessä urassa kolmiokytkennässä

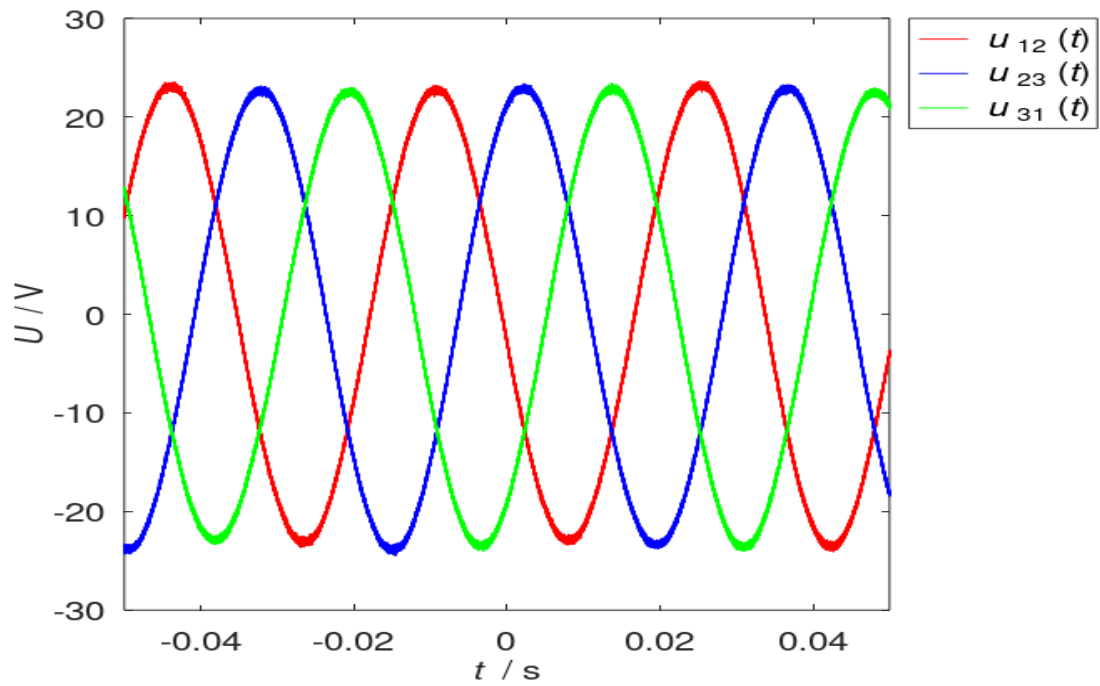
Teoriassa, kun käämilankaa siirretään toiseen vaiheen uraan, se vaikuttaisi osoitindiagrammiin, sillä tähän silmukkaan indusoituu jännite eri vaiheeseen kuin muihin saman

vaiheen käämeihin. Tätä emme havainneet. Todennäköisesti käämilankaa olisi merkittävästi pitänyt lisätä toiseen uraan, jotta haluttu ilmiö olisi saatu esille. Laitoimme 5 käämilankakierrosta toisen vaiheen käämiin, käämisilmukoiden kokonaismäärän ollessa 112. Silmukat kierrettiin käämiin vastapäivään, vastakkaiseen suuntaan kuin käämissä, josta silmukat otettiin. Periaate tästä viasta nähdään kuvasta 47.



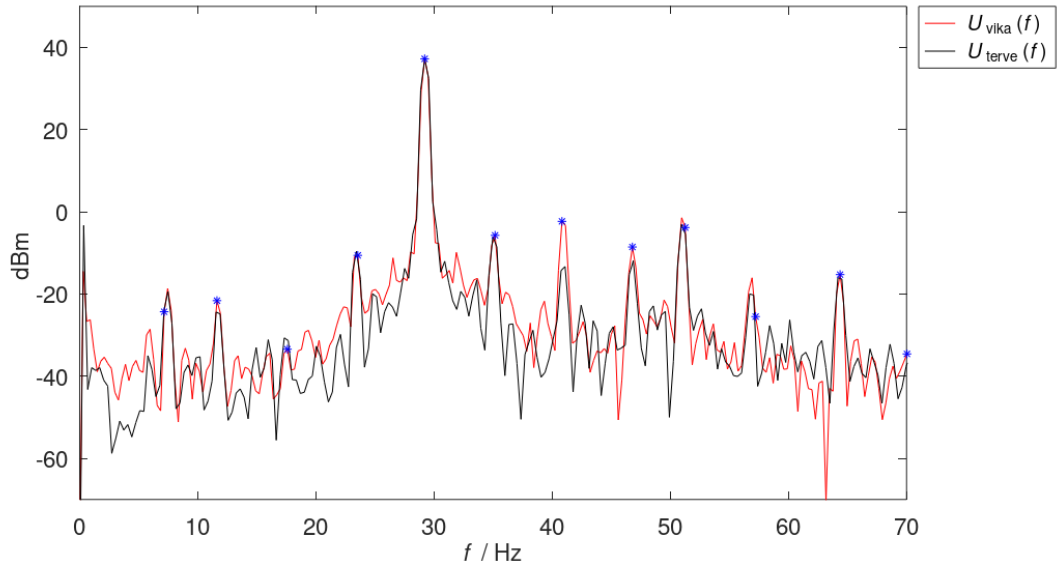
Kuva 47. U-vaiheen kytkentä, kun käämisilmukoita on siirretty käämistä a2 vierekkäiseen käämiin, joka on V-vaiheen ensimmäinen käämi. U-vaiheeseen muodostuu tällöin uusi vaihekäämi, joka tässä on merkitty tunnisteella a2'.

Pääjännitteet ovat samankaltaiset ehjään tilanteeseen nähden, kun moottori on kytketty kolmioon. Tämä on nähtävissä kuvassa 48.



Kuva 48. Pääjännitteet tilanteessa, kun käämiä viereisessä urassa kolmiokytkennässä.

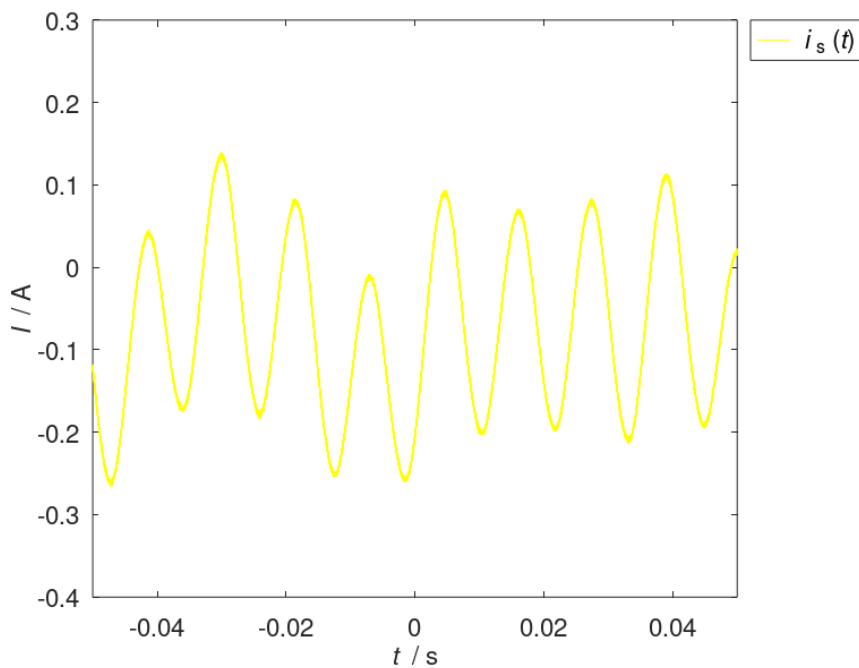
Vastajännitteen spektrissä on myös nähtävissä harmonisia komponentteja mutta nämä komponentit ovat melko samanlaisia verrattuna ehjään kolmiokytkentään nähden. Se on nähtävissä kuvassa 49.



Kuva 49. Vastajännitteen spektri, kun käämiä on viereisessä urassa kolmiokytkennässä. Vertailu ehjään tilanteeseen nähden.

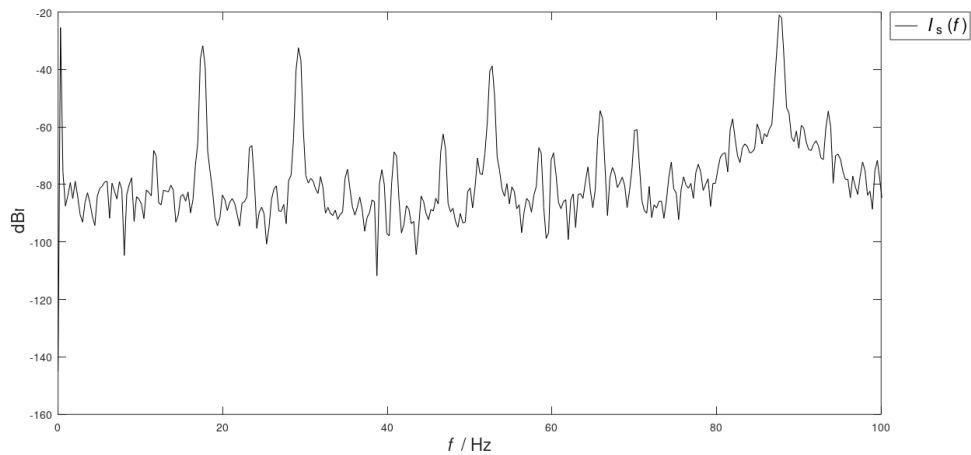
Kuvan 50 staattorivirrassa on kuitenkin nähtävissä sähköistä taajuutta alhaisemmalla taajuudella oleva virran komponentti, joka aiheuttaa suuremman ”huojumisen”. Eli käämikierroksien siirtäminen vierekkäiseen uraan aiheuttaa muutoksia moottorin suoritusarvoissa, ja tässä tapauksessa staattorivirran spektriin indusoituu alhaisen taajuuden harmoninen komponentti.

On muistettava, että toistunut moottorin uudelleen kokoaminen ja purkaminen voi aina hieman muuttaa moottorin geometriaa, jolloin poikkeuksellisia harmonisia komponentteja voi moottorin jännite- ja virtaspektrissä näkyä.



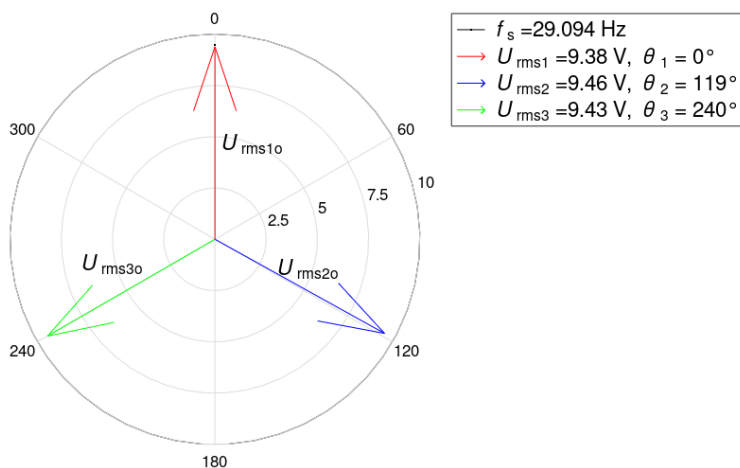
Kuva 50. Staattorivirta, kun käämiä on viereisessä urassa.

Kuten on nähtävissä kuvasta 51, staattorivirran kolmas harmoninen komponentti on suurin harmonisen virran komponentti. Sen lisäksi pyörimisnopeuden kolmas monikerta, toisin sanoen sähköisen taajuuden 0,6:s harmoninen komponentti on suuri ja suurempi kuin sähköinen taajuus.



Kuva 51. Käämiä viereisessä urassa, staattorivirran spektri.

Kuvasta 52 nähdään, että osoitindiagrammissa ei näy suuria muutoksia, kun käämiä on asetettu viereisen vaiheen uraan. Todennäköisesti käämilankaa olisi pitänyt lisätä merkittävästi toiseen uraan, jotta muutos osoitindiagrammissa olisi saatu esiin.

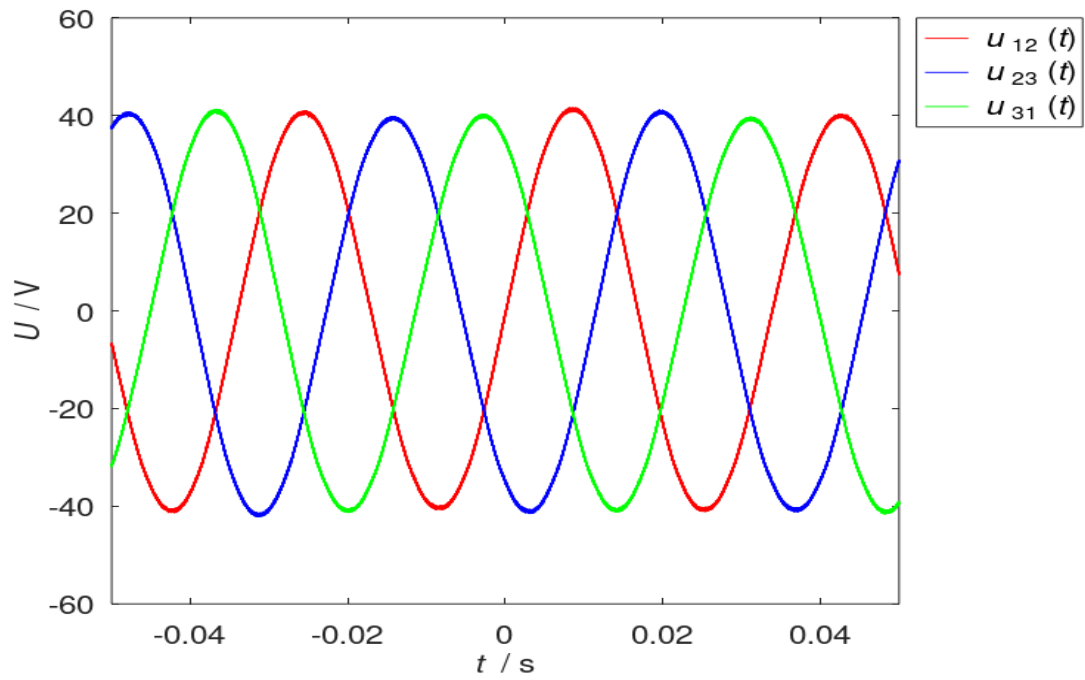


Kuva 52. Osoitindiagrammi, kun käämiä viereisessä urassa. Kolmiokytkentä.

5.4 Käämiä viereisessä urassa tähtikytkennässä

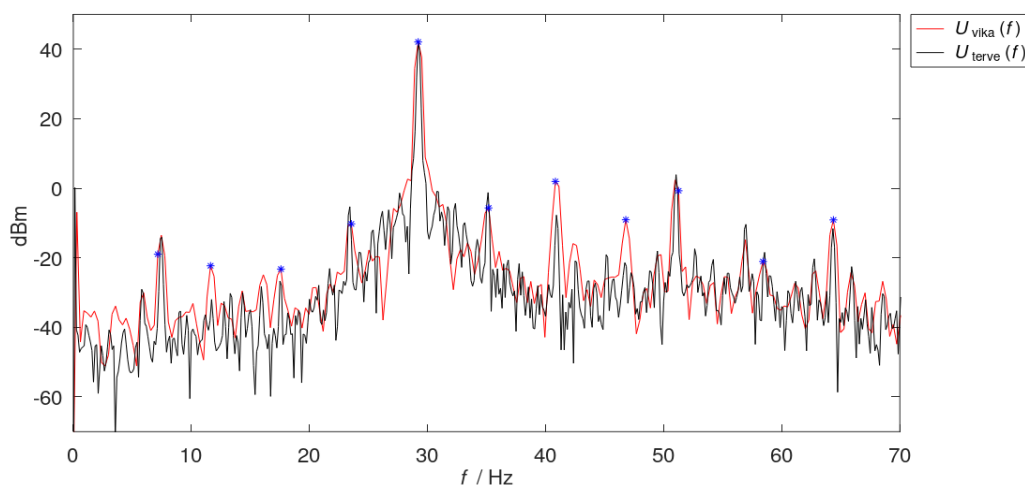
Seuraavaksi moottorin kytkentä muutettiin tähtikytkentään. Nyt induktiivista kytkeytymistä ei tapahdu, jolloin olisi oletettavissa, että osoitindiagrammimuutos on erilainen kuin kolmiokytkennässä.

Kuvasta 53 on nähtävissä sama kuin kolmiokytkennän tapauksessa, eli muutosta pääjännitteissä ei ole nähtävissä. Jälleen kierroksien määrän olisi pitänyt olla suurempi, jotta selkeä muutos pääjännitteisiin olisi nähtävissä.



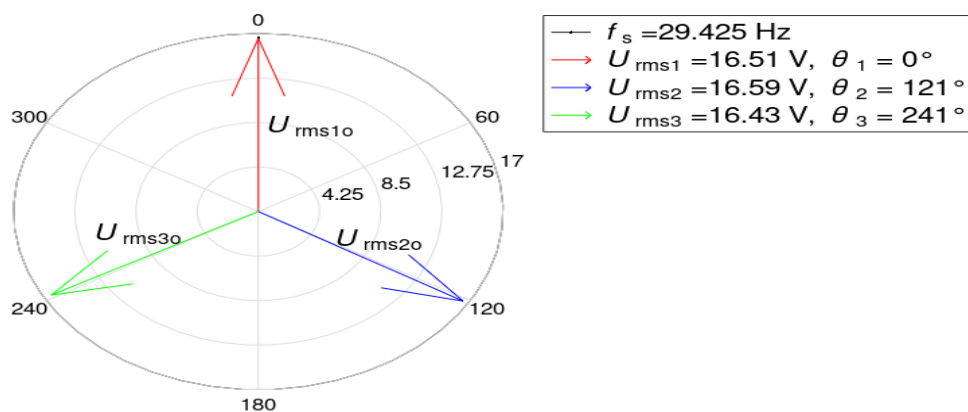
Kuva 53. Vastajännitteet tähtikytkennässä, kun käämiä viereisessä urassa.

Kuvassa 54 näkyy jännitteen spektri. Isoja harmonisia komponentteja ei ole nähtävissä jännitespektristä. Voidaan olettaa, että näkyvät piikit johtuvatkin valmistustoleranssista.



Kuva 54. Jännitespektri, kun viereisessä urassa on käämiä.

Kuten kuvasta 55 on nähtävissä, käämin laittaminen viereiseen uraan ei aiheuta muutosta myöskään tähtikytkennässä.



Kuva 55. Jännitteen osoitindiagrammi tähtikytkennässä, kun käämiä vierekkäisessä urassa.

6 Kestomagneettimoottorin vika kytkennöissä ja ilmvälissä

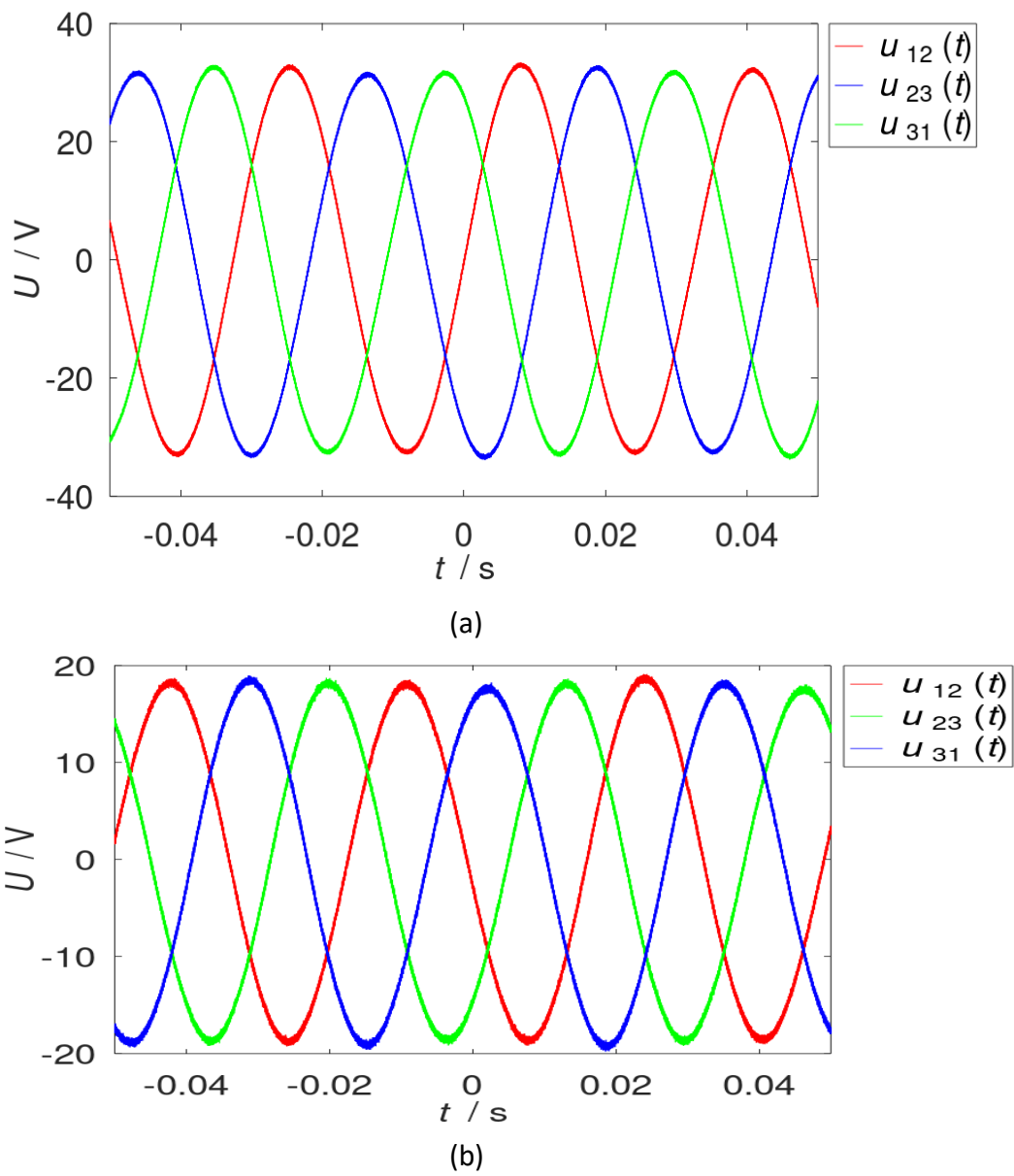
Tässä luvussa esitellään muut moottorille aiheutetut vikatilanteet, jotka eroavat edellisten lukujen vikatilanteista. Alaluvussa 6.1 moottorin ilmväliä pidennettiin. Alaluvuissa 6.1–6.2 moottorin kytkentää muutettiin kytkentäalustalla. Alaluvuissa 6.3–6.4 yhden vaiheen kytkentää muutettiin merkittävästi ohittamalla kaksi vaihekäämiä.

6.1 Ilmaraon kasvattaminen tähti- ja kolmiokytkenässä

Kuvassa 55 on moottorin pääjännitteet, kun ilmarakoa on kasvatettu tähti- ja kolmiokytkenässä. Zafaranin (2018) väitöskirjassa muodostetun reluktanssiverkon magneettivuontiheydelle B_{g1} magneetin päällä voidaan määrittää

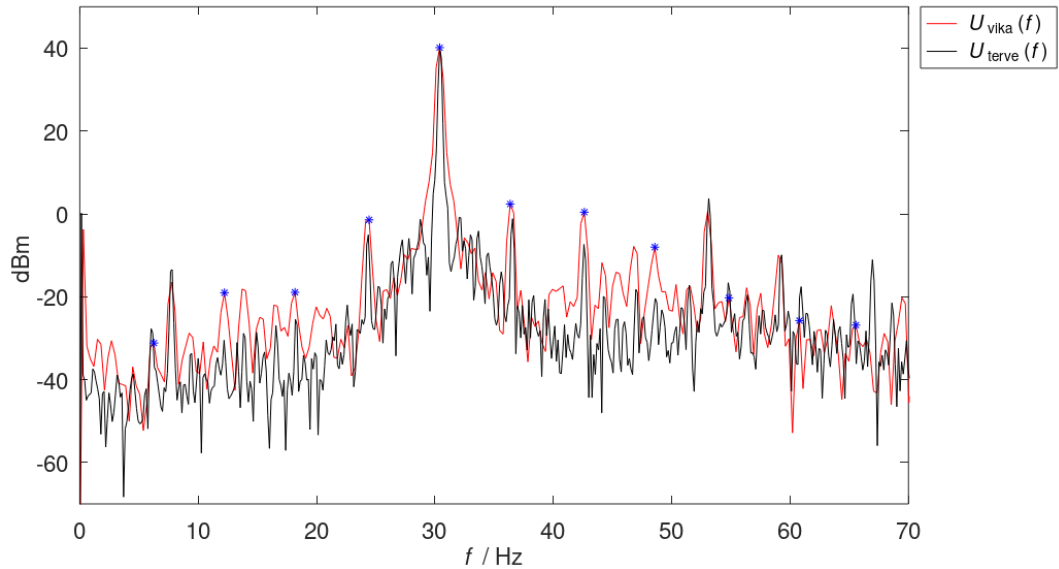
$$B_{g1} = \frac{\phi}{A_{g1}} = \frac{(1 - (\frac{\theta_{PM}}{2\pi}))B_r}{1 + \mu_{rPM}(\frac{g}{l_{PM}}) + (\mu_{rPM} - 1)(\frac{\theta_{PM}}{2\pi})}, \quad (13)$$

missä ϕ on kokonaisvuo magneetin päällä, A_{g1} on magneetin edessä olevan ilmvälin poikkipinta-ala, θ_{PM} magneetin leveys radiaaneina, μ_{rPM} magneetin permeabiliteetti, g on ilmväli ja l_{PM} on magneetin pituus. Kuten nähdään, magneettivuontiheys on kääntäen verrannollinen ilmvälin suuruuteen. Tällöin ilmvälin kasvattaminen pienentää vuontiheyttä sekä käämivuota. Koska vastajännite on käämivuon derivaatta, vastajännite alenee ilmvälin kasvun vuoksi. Moottorin pääjännitteet, kun ilmarakoa on kasvatettu, on esitetty kuvassa 56.

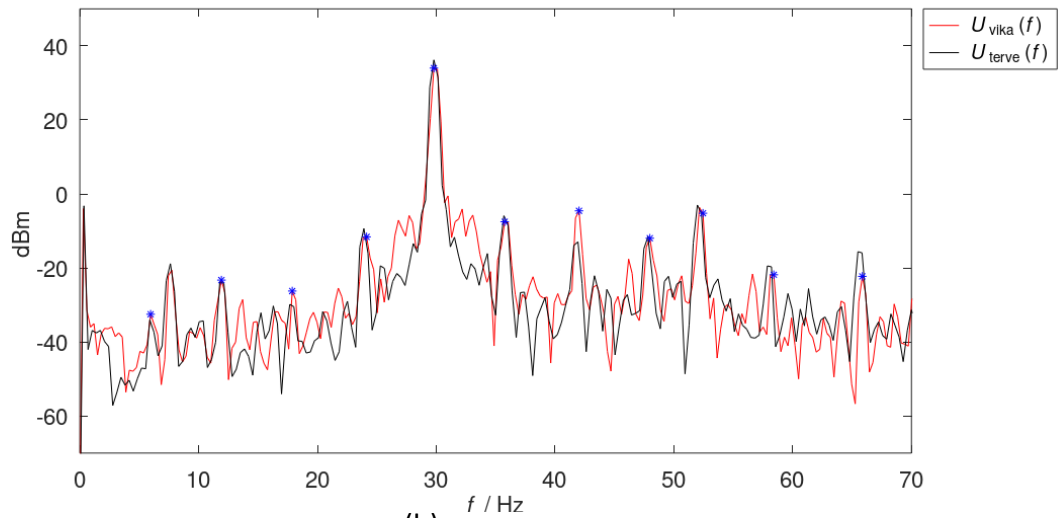


Kuva 56. Pääjännitteet, kun ilmarakoa pidennetty tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).

Harmonisten komponenttien suuruus pysyy likimain samana ilmaväliä kasvattaessakin, mikä näkyy kuvasta 57. Valtavia eroja ei nähdä, vaikka isommat ilmavälit muuttavat magneettivuon tilaharmonisia aaltoja, joka vaikuttaa moottorin toimintaan (Dhifli ja muut, 2016).



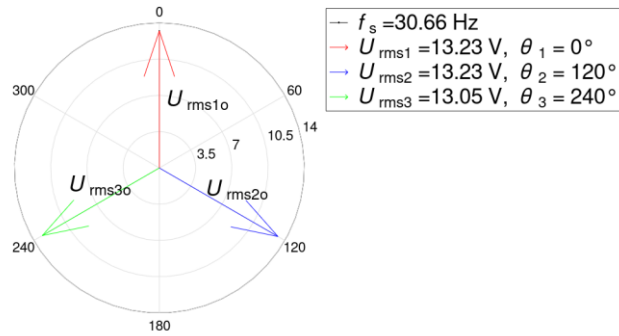
(a)



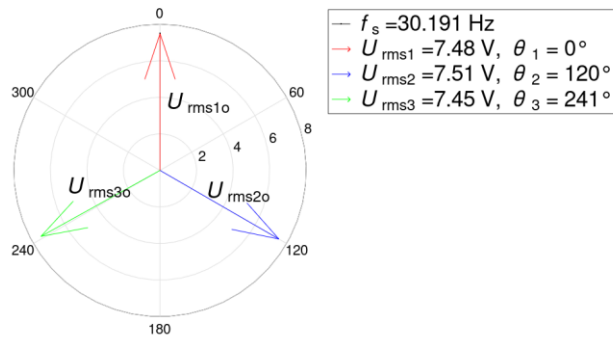
(b)

Kuva 57. Vastajännitteen taajuusspektrin vertailu ehjään perustapakukseen, kun ilmarakoa on kasvatettu tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).

Kuvassa 58 on osoitindiagrammi, kun ilmarakoa kasvatettu. Ilmaraon kasvattaminen ei muuta moottorin symmetriaa, jolloin osoitindiagrammissa näkyvät vaihe-erot säilyvät samankaltaisena ehjään tilanteeseen nähden.



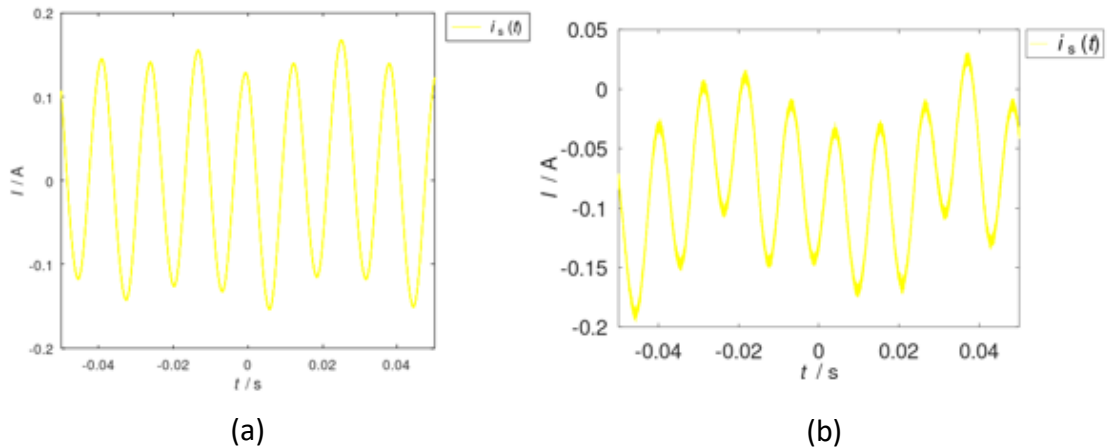
(a)



(b)

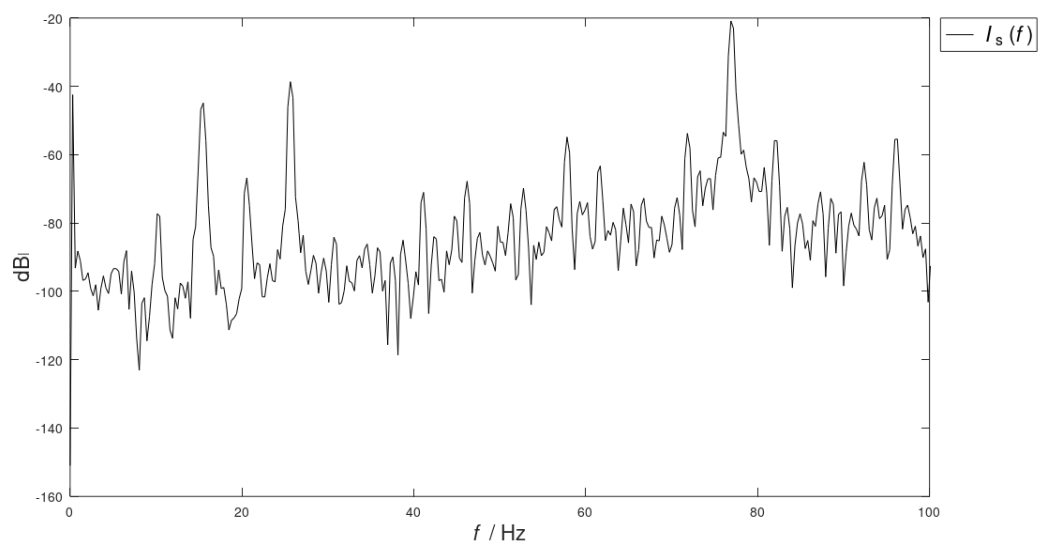
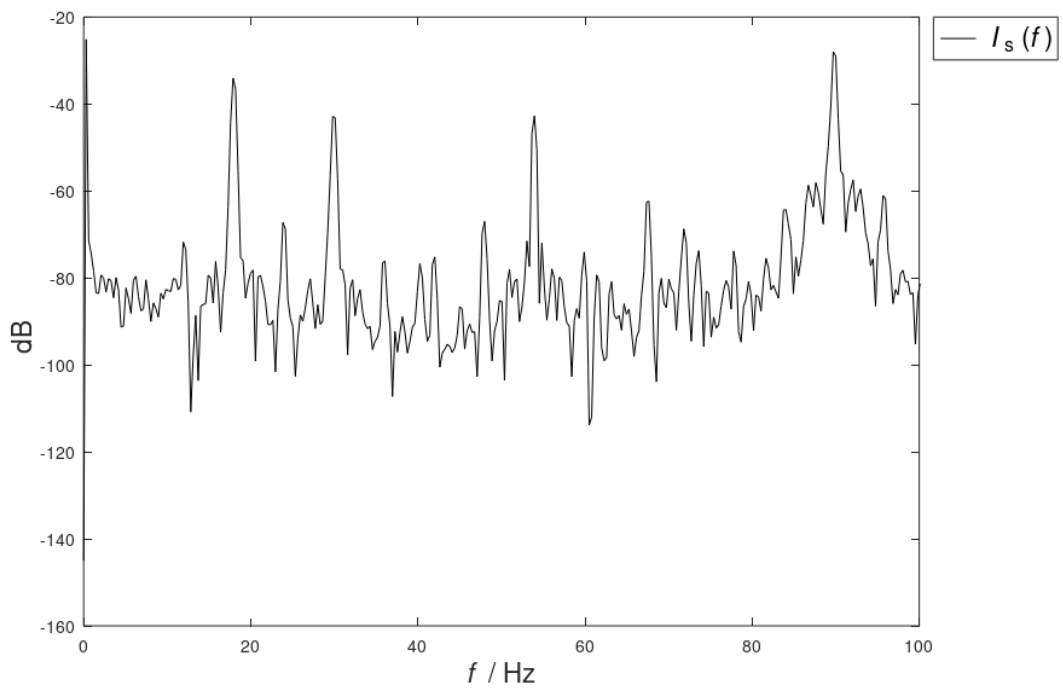
Kuva 58. Osoitindiagrammi tähtikytkennässä (a) ja kolmiokytkennässä (b).

Kuvan 59 perusteella nähdään, että virran kuvaajassa on havaittavissa selvästi muutosta. Virran suurempi ”huojuminen” viittaa alhaisen harmonisen komponentin indusoitumiseen staattorivirrassa.



Kuva 59. Staattorivirta, kun ilmaväliä kasvatettiin (a) ja ehjän moottorin tapauksessa (b) kolmiokytkennässä.

Kuten kuvasta 60 näkyy, ilmavälin kasvattaminen on aiheuttanut muutoksen pyörimisnopeuden kolmanteen, sekä seitsemänteen monikertaan. Tämä todennäköisimmin johtuu tilaharmonisten aaltojen kasvusta. Aho (2007) toteaa, että ilmavälin kasvattamisella on vaikutusta staattorin urista johtuviin yliaaltoihin. Suuri ilmaväli pienentää näitä yliaaltoja. Tässä mittauksessa on havaittu, että vastajännitteen kolmas harmoninen pienenee, kun taas edellä mainitut komponentit kasvavat. Ilmavälin vaikutus spektriin näyttäisi riippuvan merkittävästi moottorityypistä.

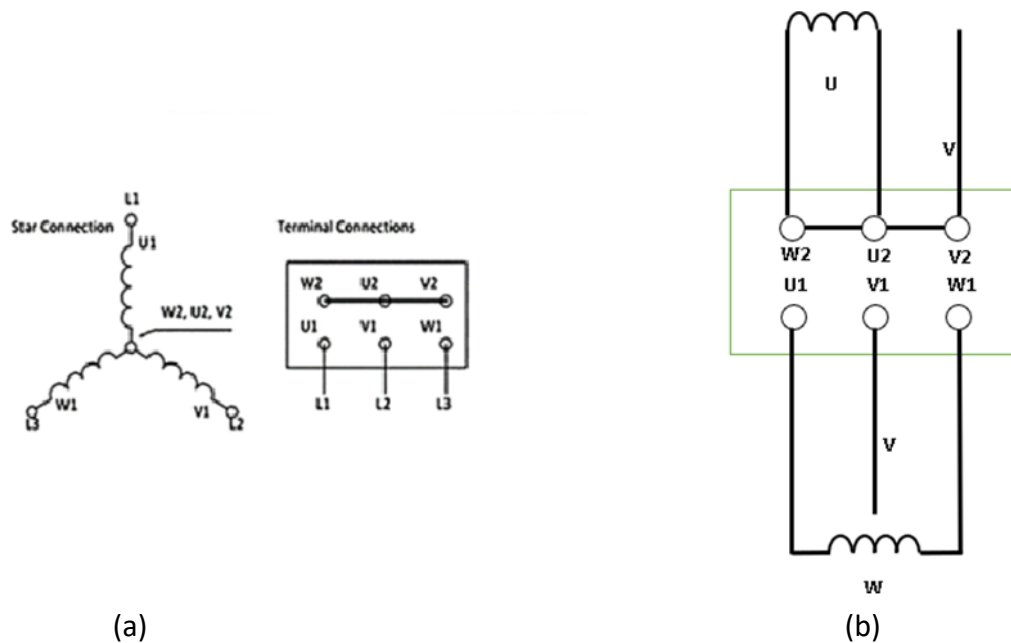


Kuva 60. Virran spektri, kun ilmapölyä kasvatettu (a) ja ehjän moottorin virran spektri (b).

6.2 Kytentävirhe terminaalissa tähtikytkennässä

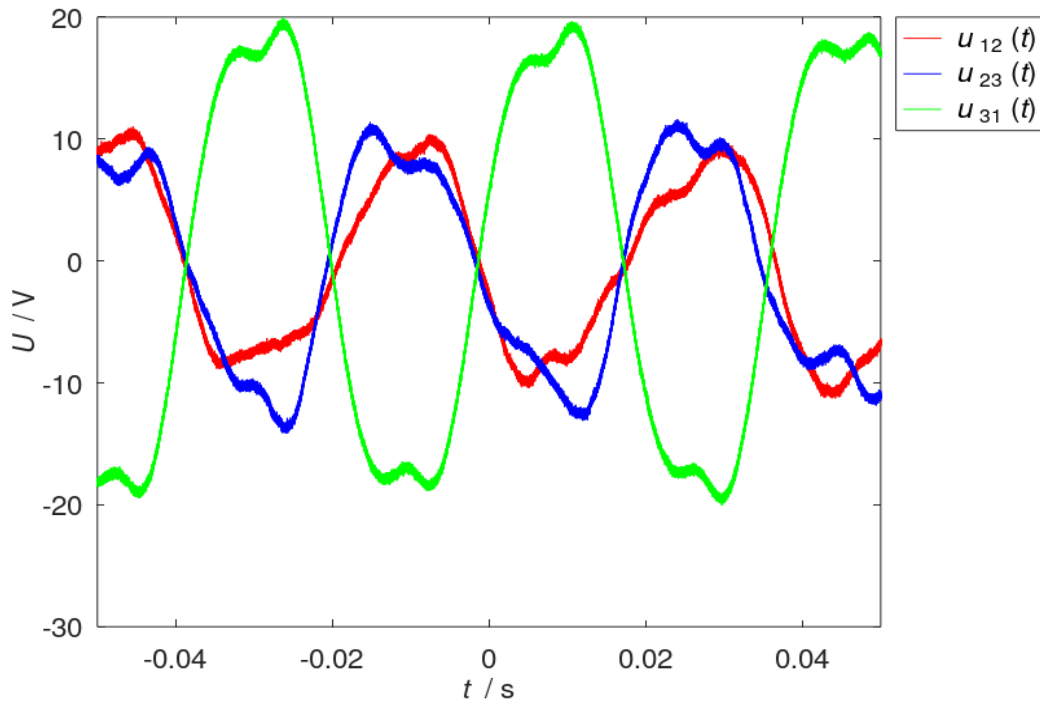
Kytentävirheessä vaihdoimme U1- ja W2-kaapeleiden paikkaa. Tällöin moottorin vaihe menee oikosulkuun. Tämä vaikuttaa moottorin toimintaan merkittävästi eikä kone suostu pyörittämään.

Kuvassa 60a on esitetty toimintaperiaatekuva kytkennöistä kytkentäalustalla. Kuvassa 61b on esitetty vikatilanne. U1-terminaaliin kuuluva kaapeli liitetään W2-terminaaliin, ja W2 kaapeli liitetään U1-terminaaliin. Tämä johtaa vaiheen U oikosulkuun.



Kuva 61. Normaali tähtikytkentä (a) (Mohammed ja muut, 2023) ja kytkentä, jossa U-vaihe oikosulussa (b).

Kuvassa 62 on nähtävissä tilanteen pääjännitteet. Jännitteiden epätasaisuus ja epäsini-
muotoisuus johtuvat siitä, että moottori vastusti pyörimisliikettä. Tällöin moottori ei
pyöri tasaisesti ja siten estää täysin sinimuotoisen jännitteen syntymisen.

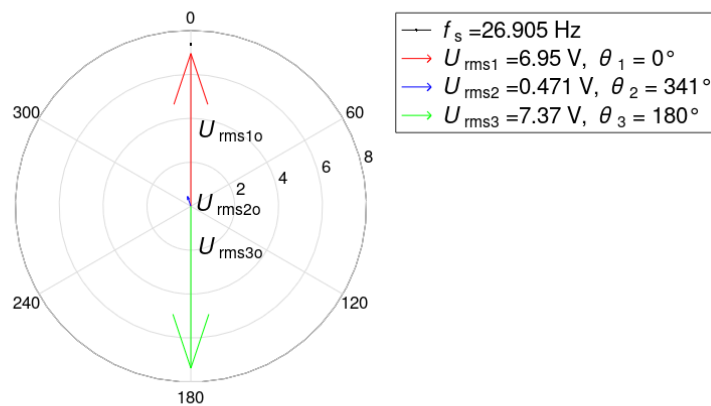


Kuva 62. Pääjännitteet kuvan 59b mukaisessa vikatilanteessa, jossa U-vaihe on oikosulussa
tähtikytkennässä.

Moottori vastustaa pyörimisliikettä, sillä suuri oikosulkuvirta aiheuttaa suuren sähköisen
momentin, joka vastustaa porakoneen tuottamaa momenttia. Tällöin porakoneen vään-
tömomentti ei riitä pitämään moottorin pyörimisliikettä tasaisena.

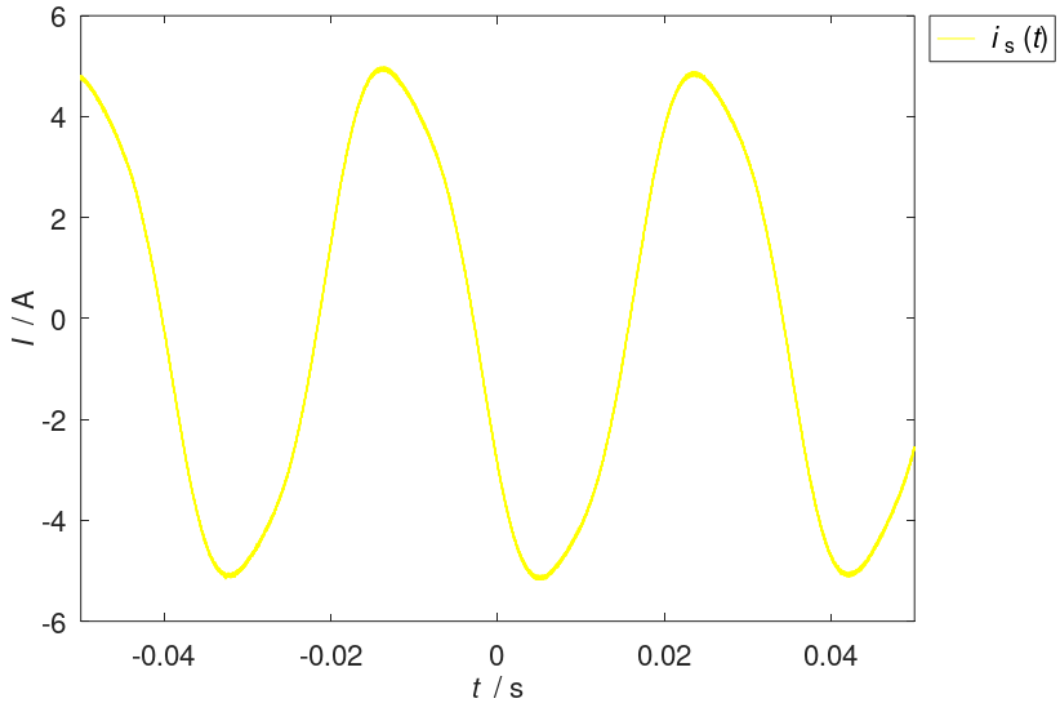
Kuvassa 63 on esillä se miten vikatilanne aiheuttaa merkittävän muutoksen osoitindiagrammiin. Nähdään, että vaiheen V jännite laskee merkittävästi, johtuen suuresta vaiheen U keskinäisestä kytkeytymisestä V vaiheen kanssa.

Kun moottori on oikosuljettu terminaalilla, yksi ehjistä vaiheista on kytketty oikosuljetun vaiheen sisääntuloon. Tämä esitettiin kuvassa 61 s.95. Tällöin, jos vaiheanalysointtori on kytketty oikein, sama vaihe mitataan kahteen kertaan. Tässä tapauksessa W-vaihe mitataan kahdesti. Sen vuoksi osoitindiagrammissa osoittimet U_{rms10} ja U_{rms30} ovat itseasiassa W-vaiheen vaihejännitteen osoittimet. U-vaiheen mittauksessa mitataan W-vaihe, mutta väärinpäin. Se johtaa automaattisesti siihen, että osoitindiagrammi näyttää osoittimien U_{rms10} ja U_{rms30} välillä olevan 180 astetta.



Kuva 63. Osoitindiagrammi vikatilanteessa.

Kuten nähdään kuvasta 64, oikosulku aiheuttaa merkittävän induktiovirran U-vaiheen käämeihin, jolloin myös tähtikytkennässä kulkee virta. Virta kulkeekin pelkästään vaiheen U käämeissä. Tämä aiheuttaa merkittävät jännitekomponentit $M_{ab} \frac{di_a}{dt}$ ja $M_{ac} \frac{di_a}{dt}$, jotka ilmenevät V- ja W-vaiheissa. Tämä olikin nähtävissä osoitindiagrammissa kuvassa 63 s. 97.

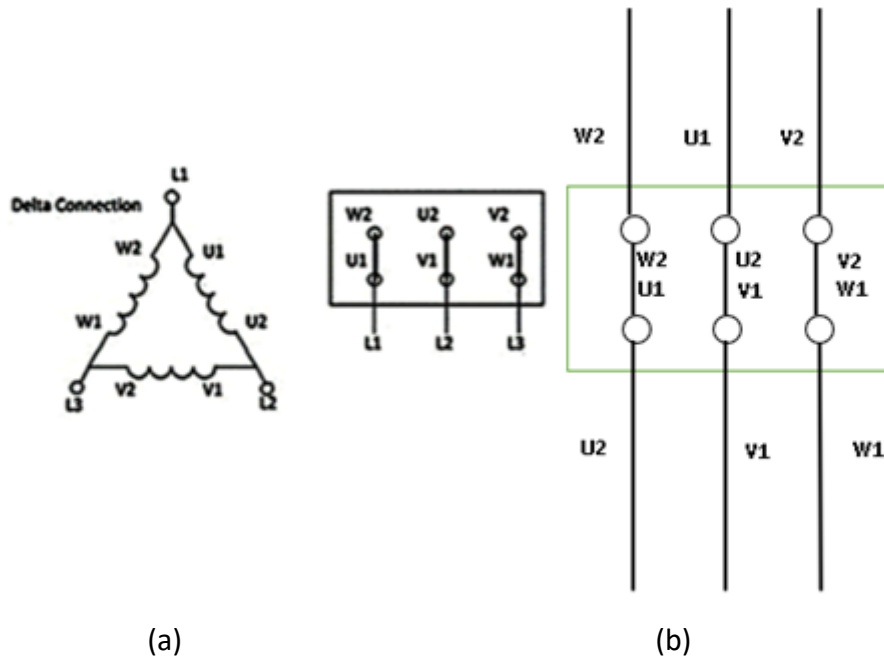


Kuva 64. Staattorivirta, kun U vaihe oikosulussa.

6.3 Kytentävirhe terminaalissa, kolmiokytkennässä

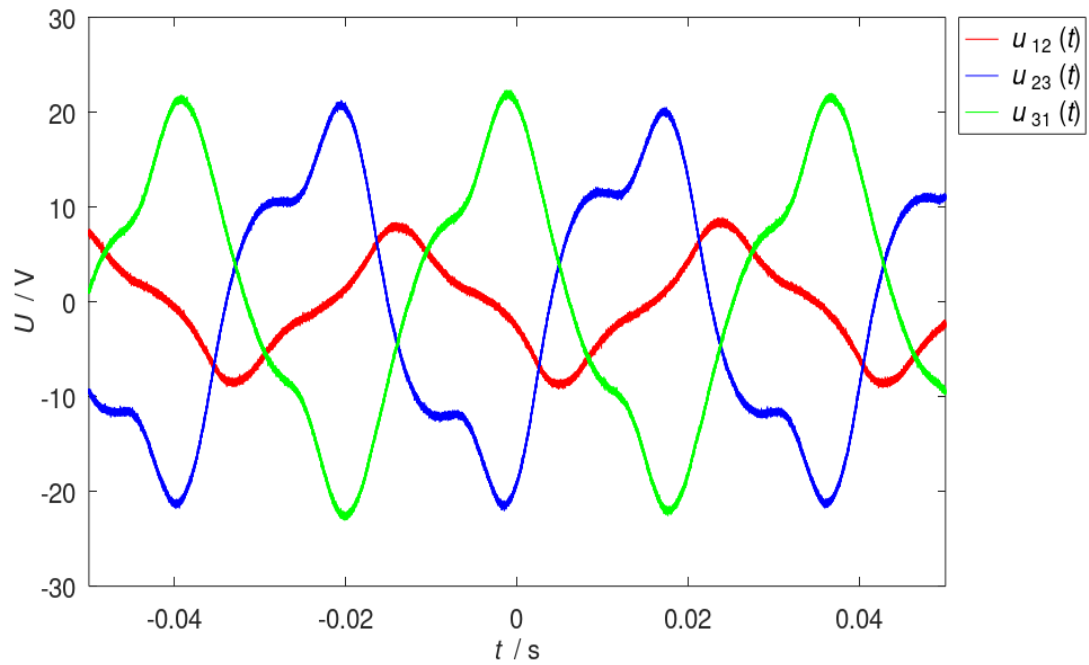
Seuraavaksi vaihdettiin U1- ja U2-kaapeliin paikkaa. Jälleen kerran, isoin kytentävian seuraus tässä tapauksessa on se, että moottori vastustaa pyörimisliikettä merkittävästi.

Kuvassa 65 on kolmiokytkennän muutos. Kuten nähdään, jos U2-ja U1-kaapelit vaihdetaan toistensa kesken, koko vaihe U1 on nyt väärinpäin. Tällöin muutos näkyy jännitekomponenteissa $M_{ab} \frac{di_a}{dt}$ ja $M_{ac} \frac{di_a}{dt}$, jolloin kytkennän pitäisi näkyä muutoksena osoitin-diagrammissa kaikissa kolmessa vaiheessa.



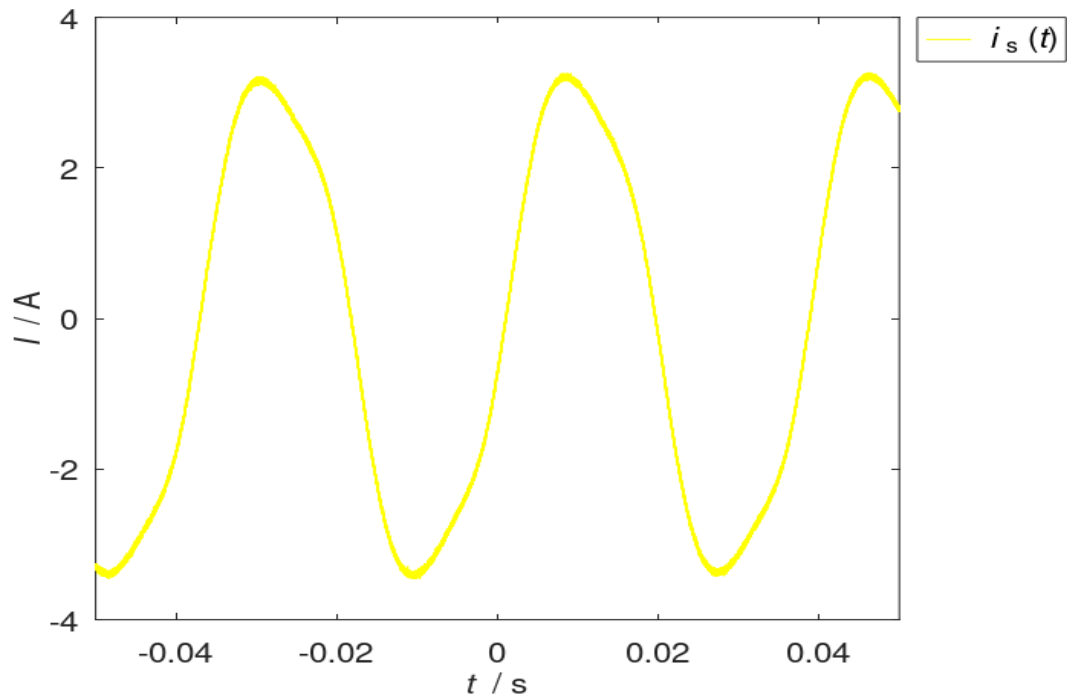
Kuva 65. Kolmiokytkentä (a) (Mohammad ja muut, 2023) ja muuttunut kytkentätilanne (b).

Kuvassa 66 on kytkentävirheestä johtuvat muutokset pääjännitteissä. Kuten on havaittavissa, se aiheuttaa merkittävän muutoksen vaihe-eroissa ja myös jännitteiden suuruuksissa.



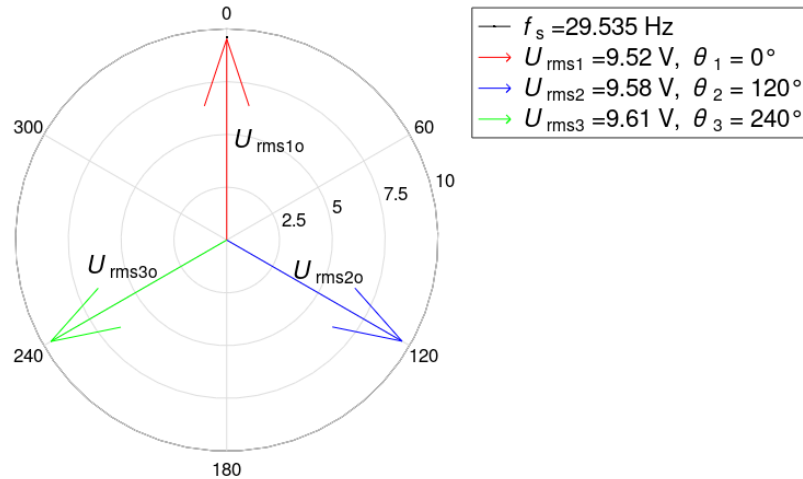
Kuva 66. Kytkentävirhe kolmiokytkennässä, kun kaapelit U1 ja U2 vaihtaneet paikkaa.

Kuvassa 67 on saman tapauksen staattorivirta, kun kytkentävirhe on aiheutettu kolmiokytkennässä. Jännitteiden summa on tässä tilanteessä myös eri, sillä U vaiheessa jännite indusoituu vastakkaiseksi. Tällöin vaihejännitteiden summa ei ole nolla, ja perustajuista virtaa muodostuu induktion vuoksi käämeihin. Suuri staattorivirta aiheuttaa jälleen suuren sähköisen momentin, joka estää moottorin stabiilin pyörimisen.



Kuva 67. Staattorivirta, kun U1 ja U2 ovat vaihtaneet paikka kolmiokytkennässä.

Kuvassa 68 on osoitindiagrammi kytkentäviassa. On mielenkiintoista havaita, että osoitindiagrammi ei ole muuttunut. Kytkennän muuttaminen ei aiheuta spatiaalista muutosta käämien välillä staattorin sisällä, minkä vuoksi symmetrisyys säilyy ennallaan.



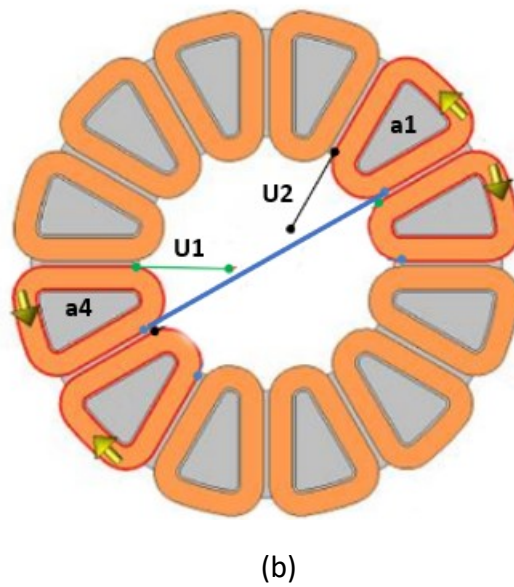
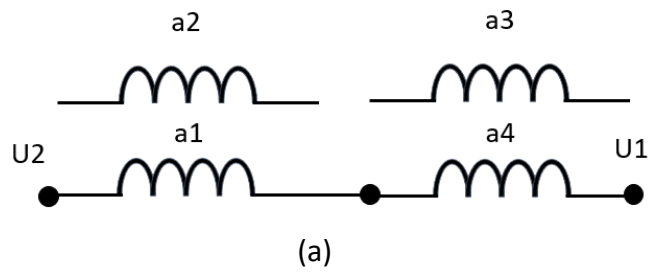
Kuva 68. Kytkentäterminaalivirhe, kun moottori on kolmiokytkennässä.

6.4 Kaksi staattorikäätymisvikaa yhdessä vaiheessa kolmiokytkennässä

Seuraavaksi U-vaiheen staattorikäätymyksessä ohitettiin kaksi vaihekäämiä. Tällöin vaiheen jännite muodostuu vain kahden vaihekäämin jännitteistä. Sen lisäksi viallinen vaihe kytkettiin kytkentäalustalla väärinpäin. Tällöin U-vaiheessa oli siis kaksi erilaista staattorivikaa.

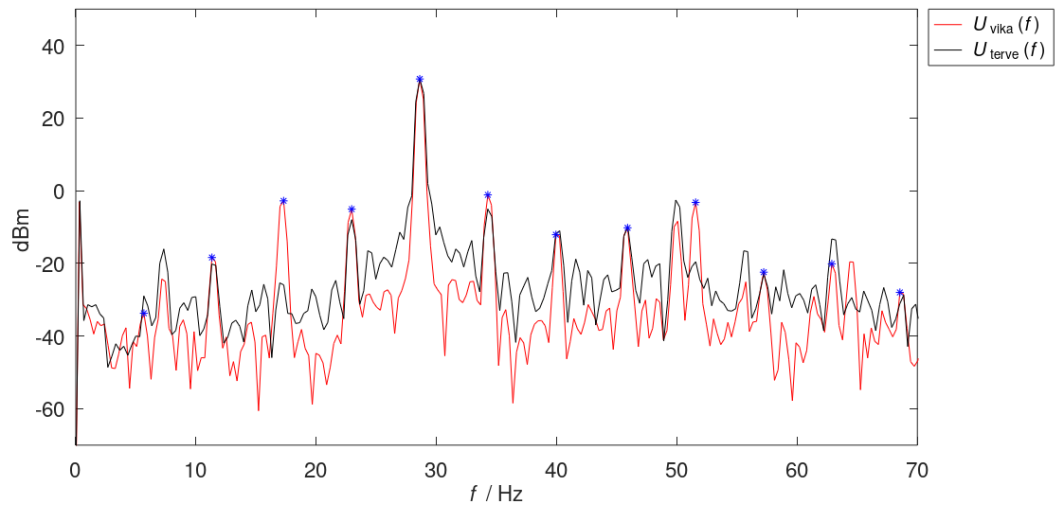
Kahden käämin ohitukset suoritettiin viimeisen mittauspäivänä. Mittausten aikana havaittiin, että virtamittaus ei näyttänyt oikeaa tulosta, vaan virran kuvaaja oli äärimmäisen kohinainen. Tästä syystä virran kuvaajat on jätetty pois esitetyistä kuvaajista.

Kuvassa 69 on tilanne missä kaksi käämiä on ohitettu, ja kyseinen vaihe on sen lisäksi käännetty väärinpäin. Tällöin kyseiseen vaiheeseen indusoituu noin puolet ehjän moottorin vastajännitteestä.



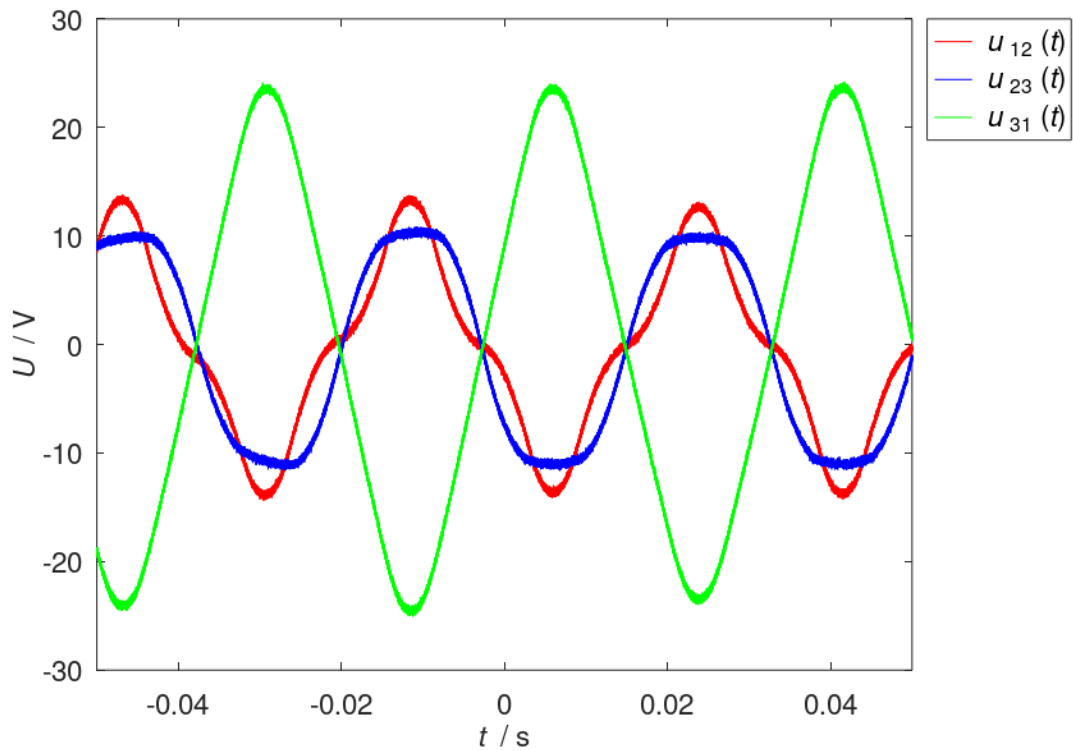
Kuva 69. U-vaihe, kun kaksi käämiä ohitettu (a). Staattorikytkentä yläpuolelta katsottaessa (b).

Kuvasta 70 nähdään, että kovin suurta eroa ehjään tilanteeseen verrattuna jännitespekt-
rissä ei nähdä. Tämä johtuu suurelta osin siitä, että käämien sijainti ei vaikuta merkittä-
västi pyörimismonikertojen suuruuteen, jos magneetit eivät ole demagnetoituneet. Jos
magneetit olisivat olleet demagnetoituneet, tällöin spektri olisi näyttänyt erilaiselta eh-
jään tilanteeseen nähden. Kuitenkin esimerkiksi kolmannessa ja yhdeksännessä pyöri-
misnopeuden monikerrassa on jonkin verran kasvua.



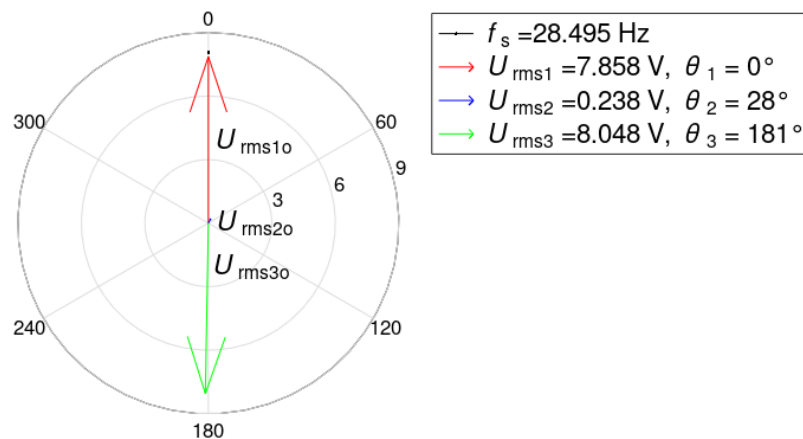
Kuva 70. Jännitteen spektri, kun kaksi käämiä ohitettu ja kun oikea kytkentä kolmiokytken-
nässä.

Pääjännitteiden muutos nähdään todella selvästi kuvasta 71. Nähdään, että pääjännitteet U_{ab} ja U_{ac} ovat vaihesiirrossa 180 astetta suhteessa pääjännitteeseen U_{cb} verrattuna. Pääjännitteeseen U_{ab} on myös indusoitunut kolmas harmoninen komponentti.



Kuva 71. Pääjännitteet kolmiokytkennässä, kun kaksi käämiä on ohitettu ja vaihe on väärinpäin.

Testattu yhden vaiheen suuri staattorivika kolmiokytkennässä johtaa hyvin selvään jännitteenalenemaan vaiheessa 2, kun kaksi muuta vaihetta pysyvät ennallaan. Tämä näkyy selvästi kuvasta 72. Vaiheiden U ja V välille tulee merkittävä keskinäinen kytkeytyminen, joka johtaa vaihejännitteen V alenemaan. Vaiheet U ja W ovat 180 asteen kulmassa toisiinsa nähden.

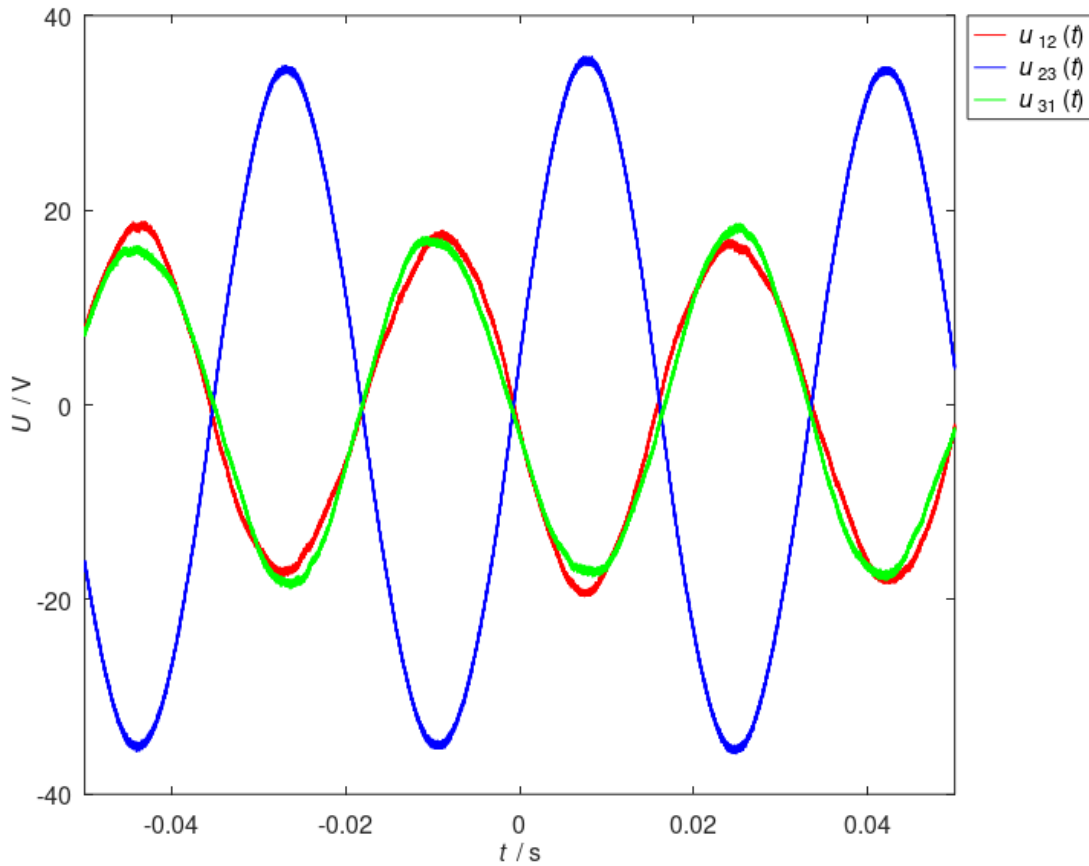


Kuva 72. Osoitindiagrammi kolmiokytkennässä, kun kaksi käämiä ohitettu.

6.4 Kaksi staattorikäätövikaa yhdessä vaiheessa tähtikytkennässä

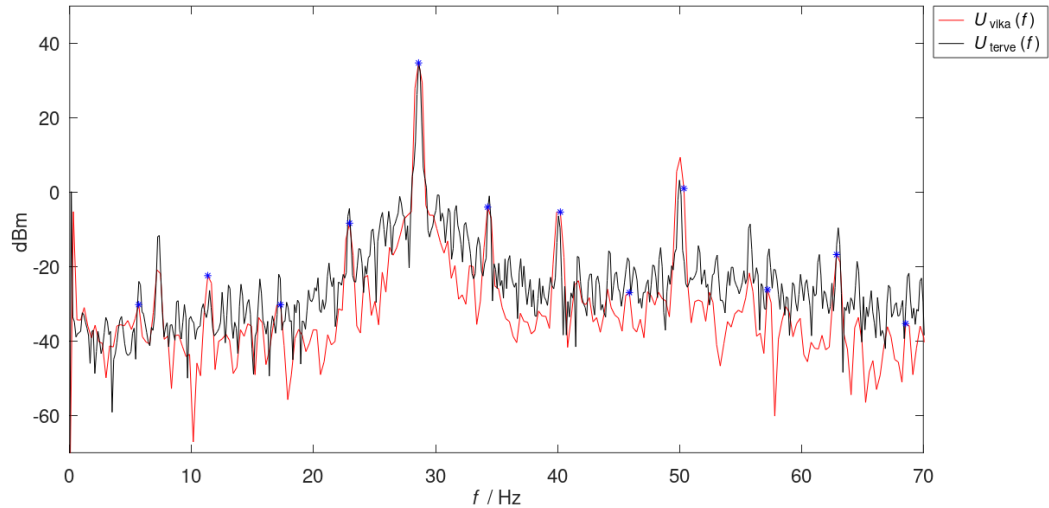
Seuraavaksi testatun moottorin kytkentä muutettiin tähtikytkentään kytkentäalustalla. Oletuksena oli, että osoitindiagrammi sekä pääjännitekuvaaja eivät ole samankaltaiset tähtikytkentään verrattuna. Kuten muissakin staattorivioissa, kolmiokytkennässä syntyy induktiovirta, jonka vuoksi mittauksessa esiintyy vastajännitteen lisäksi staattorikäätöjen jännitteen alenema. Tähtikytkennässä mitattu jännite oli vain indusoitunut vastajännite.

Kuten kuvasta 73 nähdään, tässä testissä, nähdään todella merkittävä muutos jännitteissä verrattuna kolmiokytkenän pääjännitteisiin kuvassa 71 s. 105. Kuvassa näkyy, kuinka käänntävirhe muuttaa jälleen vaihe-eroja siten, että pääjännitteet $u_{12}(t)$ sekä $u_{31}(t)$ menevät samaan vaiheeseen. Tämä on merkittävä ero esimerkiksi tilanteeseen, aiheutettiin vika kahden vaiheen välillä.



Kuva 73. Pääjännitteet tähtikytkennässä, kun kaksi käämiä ohitettu yhdessä vaiheessa.

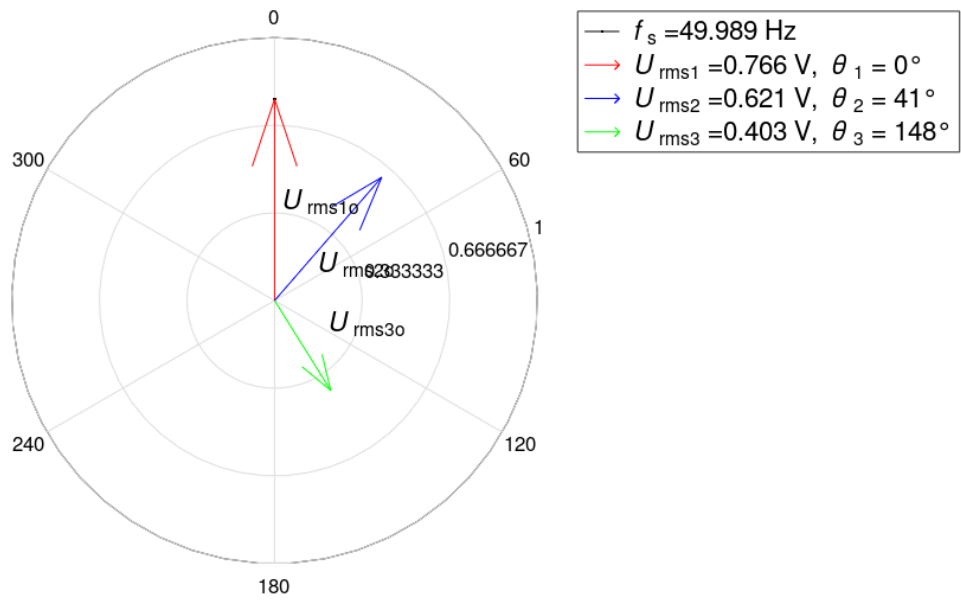
Kuten nähdään kuvasta 74, suuri vaihevika ei vaikuta spektriin merkittävästi. Syy on sama kuin kolmiokytkennässä, jos magneetit eivät ole demagnetoituneet, käämien spatiaalinen muutos toisiinsa nähden ei vaikuta vastajännitespektriin ideaalisesti.



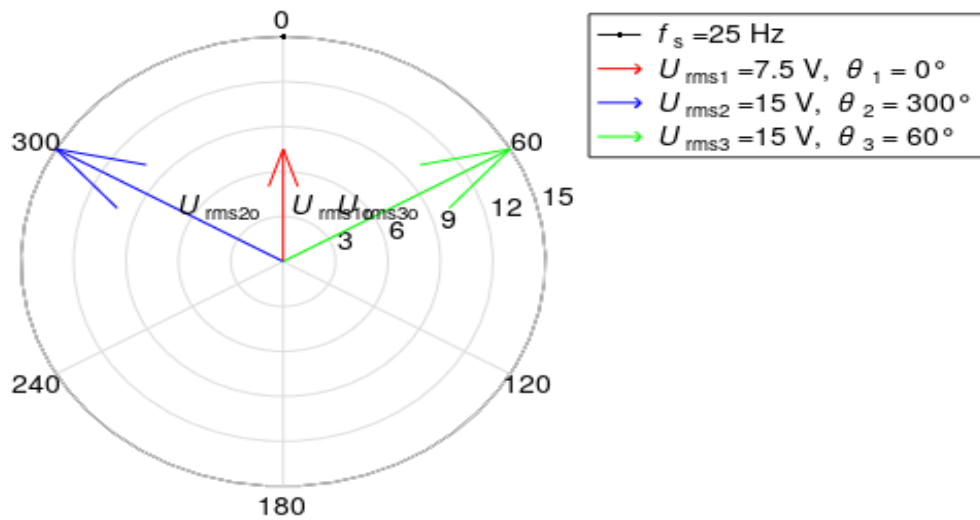
Kuva 74. Vastajännitespektrit tähtikytkennässä, kun kaksi käämiä on ohitettu yhdessä vaiheessa.

Kuvassa 75a on merkittävä ero kuvan 73 s. 107 pääjännitekuvaajan vaihe-eroihin. Nähdään, että tämän mittauksen osoitindiagrammimittaus on epäonnistunut. Kaikkien vaiheiden jännite on aivan liian pieni, jotta voitaisiin olettaa, että vaihejännitteet ovat oikeelliset.

Kun kaksi käämiä on ohitettu U-vaiheessa, kyseisen vaiheen vaihejännite puolittuu. Jos tämä viallinen vaihe käännetään vielä väärinpäin, vaihejännitteen osoitin siirtyy 180 astetta. Teoreettinen vikatilanteen osoitindiagrammi on esitetty kuvassa 75b.



(a)



(b)

Kuva 75. Mitattu osoitindiagrammi, kun kaksi käämiä on ohitettu ja vaihe on käännetty väärinpäin yhdessä vaiheessa tähtikytkennässä (a). Teoreettinen osoitindiagrammi, kun kaksi käämiä on ohitettu yhdessä vaiheessa tähtikytkennässä (b).

7 Vikapuu rutiinikoestukseen

Mittaustulosten perusteella olennaisin asia oli havaita, että staattorikäymintäviat aiheuttivat merkittäviä muutoksia osoitindiagrammiin, toisin kuin roottoriin tehdyt muutokset. Tällöin osoitindiagrammin käyttäminen rutiinikoestuksessa olisi merkittävä toimintatapa erottamaan roottoriviat ja staattoriviat keskenään. Kohdeyrityksen koestajat eivät käytä osoitindiagrammia tällä hetkellä.

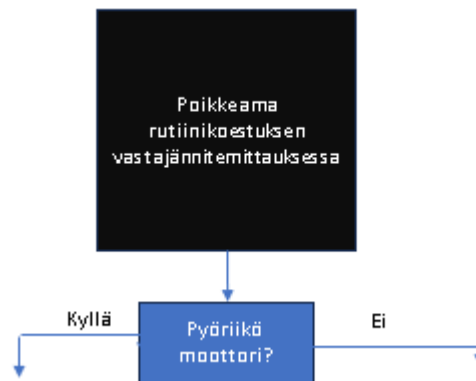
Tässä luvussa on rakennettu vikapuu vaiheittain vikadiagnostiikan avuksi rutiinikoestukseen. Toimenpiteet, diagnoosit sekä tehtävät testit on perusteltu jokaisessa vaiheessa.

Kuvassa 76 on esitetty idea vikapuusta, jonka avulla voitaisiin diagnosoida moottorin vika rutiinikoestuksen aikana. Vikapuu lähtee liikkeelle poikkeamasta vastajännitetestissä, jonka avulla tiedetään moottorissa olevan jotain vialla. Vikapuussa sinisellä värillä on esitetty testi tai kysymys, punainen väri ilmaisee vian ja vihreä väri näyttää tehtävän toimenpiteen. Kuva vikapuusta löytyy liitteenä suurempana.



Kuva 76. Vikapuhahmotelma vikadiagnostiikan avuksi.

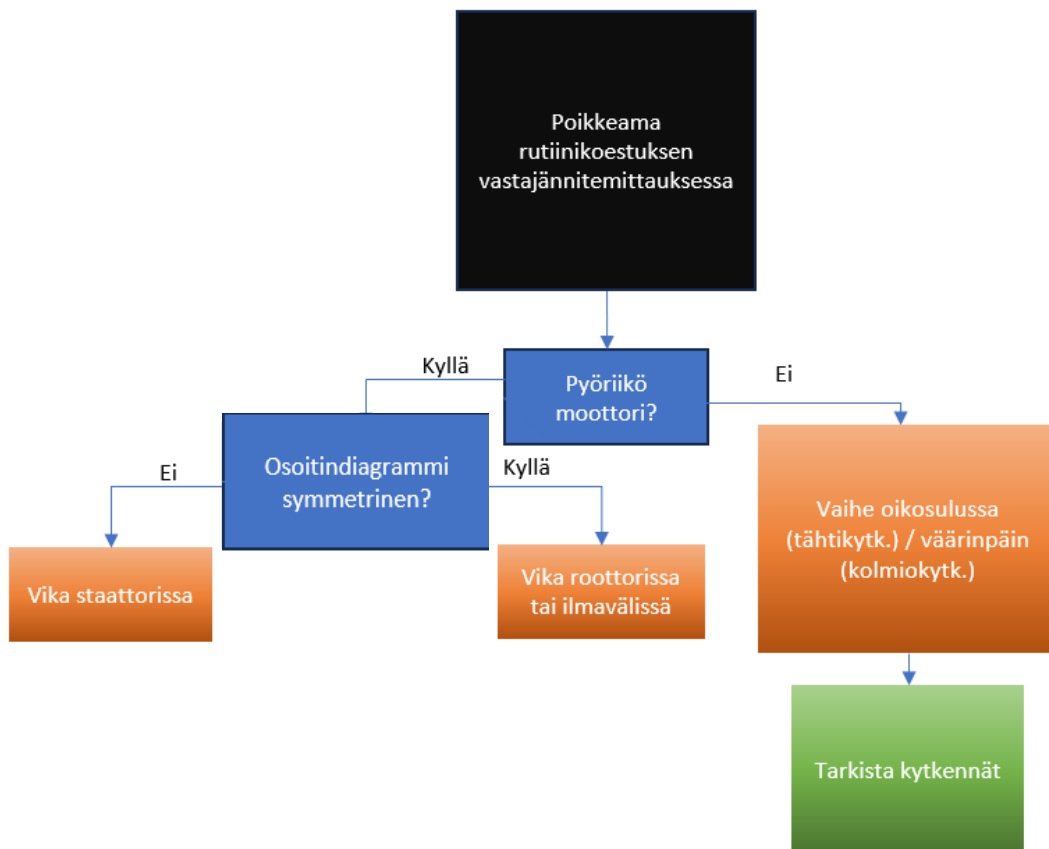
Mittausten aikana havaittiin, että moottorin pyörittäminen ei käytännössä ole mahdollista, kun moottori on terminaalilla kytketty esimerkiksi oikosulkuun. Kolmiokytkennässä myös yhden vaiheen kääntö väärinpäin aiheutti suuren vastamomentin. Tästä syystä ehdotus ensimmäiseksi testiksi on pyörittää roottoria ja testata sen kyky liikkeeseen. Vikapuun ensimmäinen haara tämän perusteella on esitetty kuvassa 77. Tässä haasteina on tunnistaa moottorin luontainen vastustus pyörimistä vastaan esimerkiksi raskaiden moottorien tapauksissa. Sen lisäksi asiaa on mietittävä työturvallisuuden kannalta, sillä pyöryksessä voi olla riski elimien jäämistä staattorin ja roottorin väliin. Toimenpiteinä on tarkistaa kytkennät moottorin terminaalilta, ja kytkeä staattori siten oikein.



Kuva 77. Vikapuun ensimmäinen oksa.

Jos moottori pyörii normaalisti ilman suurempaa vastustusta, tällöin vika on todennäköisimmin muualla kuin kytkennöissä. Kuten mittausten aikana havaittiin, roottori- ja staattorivikojen välillä havaittiin ero osoitindiagrammissa ja spektreissä. Mittaustulosten perusteella on pääteltävissä, että osoitindiagrammi näyttää eron staattori- ja roottorivikojen tapauksissa tehtyjen vikojen tapauksissa.

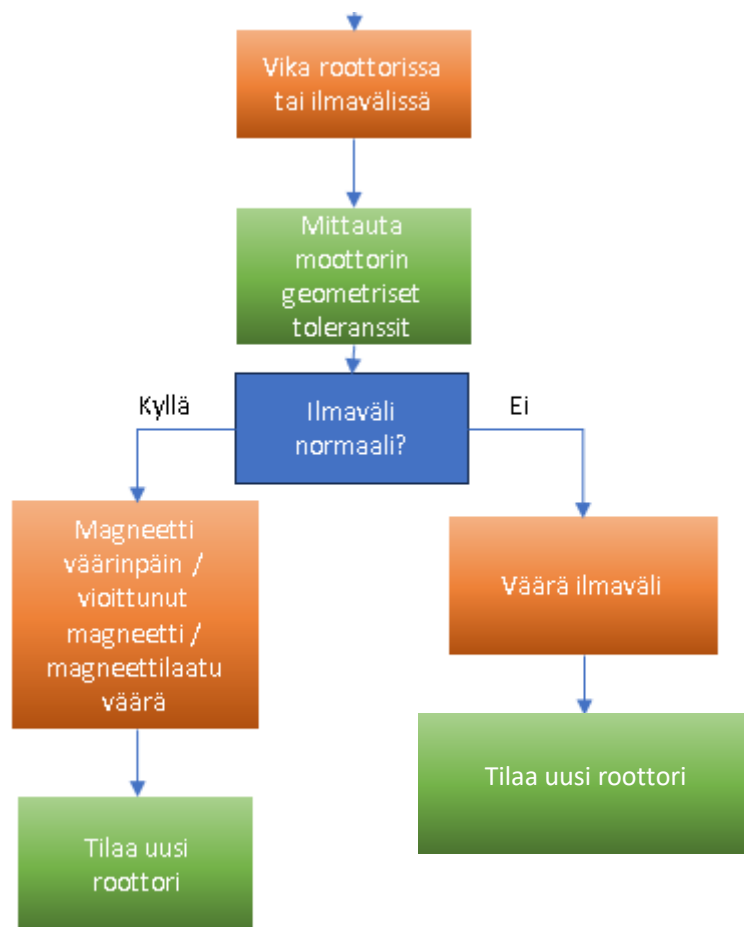
Kuvassa 78 vikapuu on kehitetty edelleen ilmaisemaan seuraavia toimenpiteitä. Kuten mittausten aikana havaittiin, staattorikäännytyksiin aiheuttavat epäsymmetriaa jännitteisiin, jolloin osoitindigrammin muutos on eräs indikaattori vian löytämiseksi. Jos osoitindigrammi on symmetrinen, on vika todennäköisimmin roottorissa tai ilmavälissä. Ilmaväli voi olla liian suuri, roottorissa voi olla esimerkiksi magneetti väärinpäin, tai magneettilaatu on valittu väärin.



Kuva 78. Kehitetty vikapuu, jossa osoitindigrammin avulla on voitu diagnosoida ero staattorin käännytyksiin ja roottorin magneettiviassa.

Tämän jälkeen toimenpiteet ovat suhteellisen suoraviivaisia. Jos vika on roottorissa tai ilmavälissä, on ratkaisuna tilata uusi roottori. Jos tiedetään, että vika on staattorissa eikä hartsauksen jälkeen sisäisiä staattorikytkentöjä voida enää muuttaa, on toimenpiteenä tilata uusi staattori.

Kuvassa 79 näkyy vikapuun oikea haara, jossa osoitindiagrammin symmetriahavainnoinnin jälkeen mittaautetaan moottorin toleranssit, jolloin voidaan päätellä, että onko ilmaväli oikea. Jos ilmaväli on oikean suuruinen, tällöin siirrytään vikapuun vasempaan haaraan, jolloin voidaan vian päätellä olevan magneeteissa. Tällöin toimenpiteenä on tilata uusi roottori. Jos vika on ilmavälissä, yleensä tällöinkin toimenpiteenä on tilata uusi roottori. On kuitenkin hyvä pystyä erottamaan vika näiden kahden välillä, vaikka jatko-toimenpide on sama. Juurisyyyn perusteella päätetään, mille tuotantolinjan osastolle palaute annetaan.

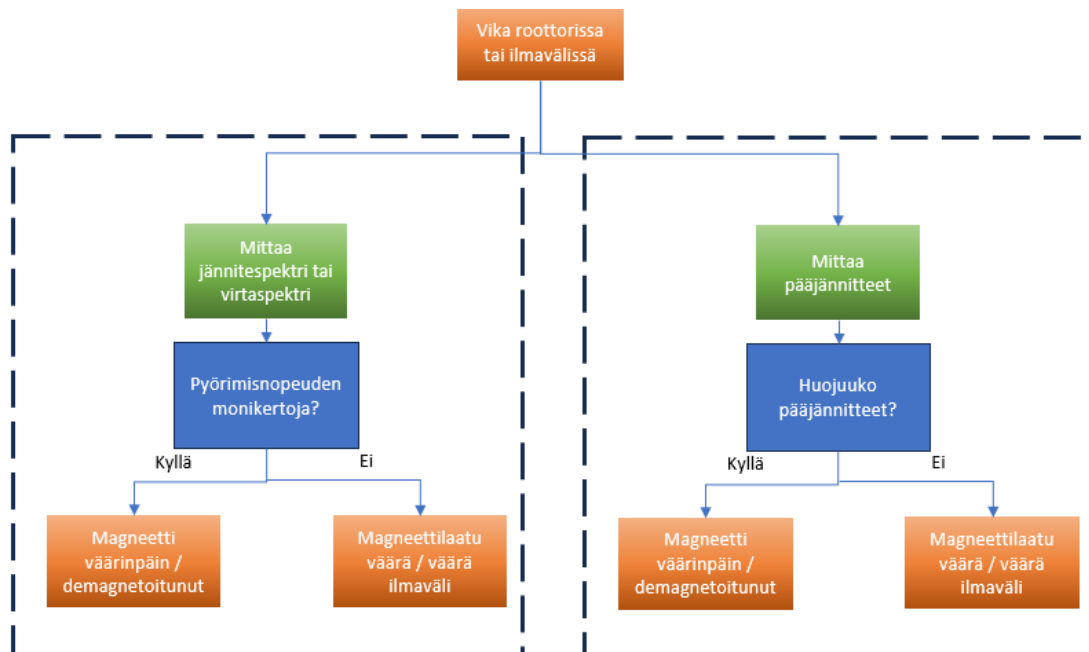


Kuva 79. Juurisyyanalyysi, kun on päätelty vian olevan roottorissa tai ilmavälissä.

Rutiinikoestuksessa tehtävillä toimenpiteillä voidaan päästä tilanteeseen, jossa toimenpiteenä on tilata moottoriin uusi roottori. Suuremmalle juurisyyanalyysille ei sinällään

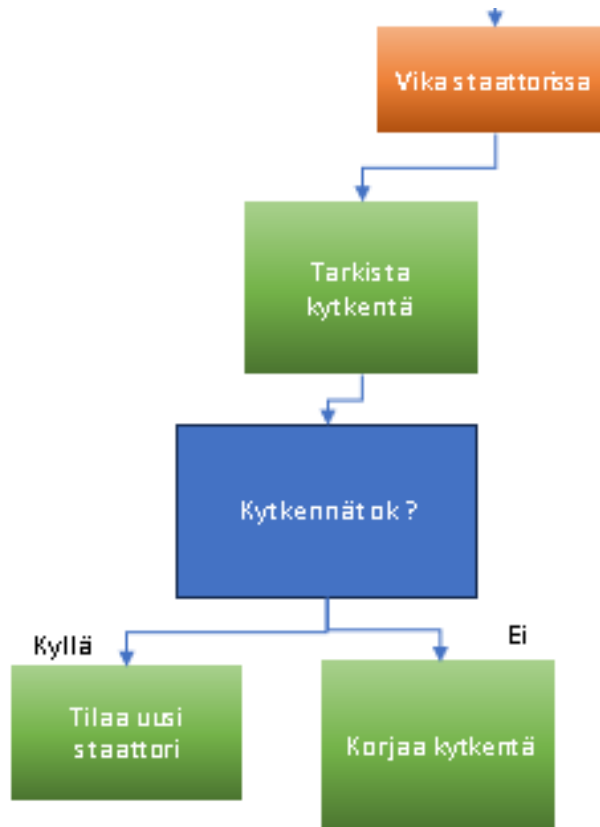
ole tarvetta. Kuitenkin kohdeyrityksen laatuosasto voi tarvita vielä tarkempaa juurisyyanalyysia, jotta tiedetään täsmälleen moottorissa oleva vika.

Kuvassa 80 on esitetty erottelu, joka voidaan tehdä spektrianalysaattorilla ja pääjännitemittauksella. Väärä ilmaväli, tai väärä magneettilaatu vähentävät indusoitunutta vastajännitettä, mutta eivät muuta radikaalisti vastajännitteen spektrin sisältöä. Kuten mittauksissa havaittiin, ja miten tutkimuskirjallisuudessa on havaittu, magneetin asennus väärin aiheutti jännite- ja virtaspektreihin pyörimisnopeuden monikertoja. Tällä tiedolla voidaan tehdä ero näiden kahden vian välillä. Jos spektrissä ei näy merkittäviä roottorin pyörimisnopeuden piikkejä vastajännitteen tai staattorivirran spektrissä, on ilmaväli todennäköisesti liian suuri tai magneettilaatu on väärä. Erottelu voidaan tehdä myös pääjännitemittauksella. Kuten kuvasta 26 s. 57 ja kuvasta 32 s. 66 havaittiin, pääjännite alkaa huojumaan magneettivioissa. Tätä ei tapahdu ilmavälillä tai magneettilaadun ollessa väärä.



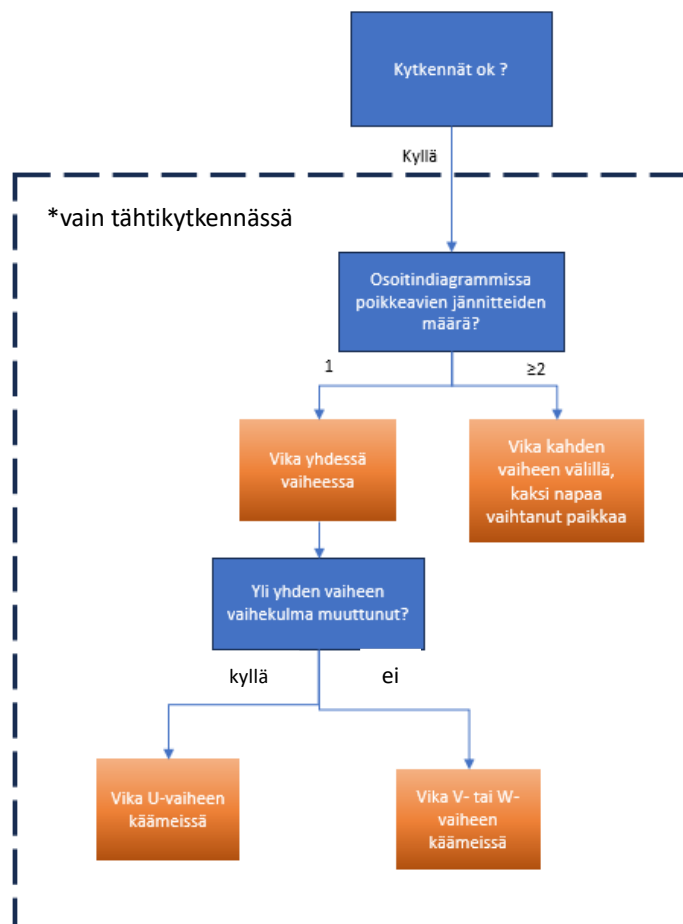
Kuva 80. Juurisyyanalyysi spektrin avulla.

Vikapuun johtama toimenpide, kun mittaustuloksissa on tullut poikkeama ja osoitindia-grammi on epäsymmetrinen, näkyy kuvassa 81. Tällöin staattori joudutaan tilaamaan uudelleen. Tätä ennen on kuitenkin varmistuttava, että moottori on kytketty oikein. Sen vuoksi kytkennän tarkistus on ensimmäinen toimenpide. Moottorin kytkentävika voi aiheuttaa myös muutosta osoitindiagrammissa, jolloin vikatilanne poistuu tekemällä kytkentä oikein. On nimittäin mahdollista, että on olemassa kytkentöjä, joissa moottori pyörii silti helposti, vaikka kytkentä on väärä. Tämän jälkeen, kun tiedetään, että staattori on kytketty oikein, mutta osoitindiagrammi näyttää silti väärää, voidaan päätellä, että staattori on kytketty väärin sisäisesti. Toimenpiteenä on uuden staattorin tilaaminen.



Kuva 81. Toimenpiteet, kun osoitindiagrammi on epäsymmetrinen.

Kuvassa 82 on tarkempi juurisyyanalyysi kytkentöjen ollessa oikein. Jos vika on kahdessa vaiheessa, kuten alaluvuissa 5.1–5.2 esitetyissä staattorivioissa, näkyy jännitteenalenema kahdessa vaiheessa. Jos vika on taas yhdessä vaiheessa, vain yhdessä vaiheessa on jännitteenalenema tähtikytkennässä. Jos vika on V- tai W-vaiheessa, tämän vaiheen vaihejännite on muita alempi, ja vaiheen vaihe-ero eroaa symmetrisestä tapauksesta. Jos vika on U-vaiheessa, poikkeava vaihe-ero näkyy sekä V- ja W-vaiheissa. Tämä ilmiö tapahtuu, sillä oskilloskooppi ottaa aina U-vaiheen jännitteen referenssiksi, jolloin sen vaihekulma on 0° . Jos staattori on kytketty kolmiokytkentään, juurisyyanalyysin tekeminen voi olla haasteellisempaa. Jos vika on vain yhdessä vaiheessa, kolmiokytkentään muodostuu perustaajuinen induktiovirta. Tämä induktiovirta aiheuttaa jännitteenalenemaa kaikissa vaiheissa. Sen takia yhden vaiheen vika voi näkyä osoitindiagrammissa kaikissa vaiheissa.



Kuva 82. Tarkempi juurisyyanalyysi viallisten vaiheiden löytämiseksi.

8 Johtopäätökset

Tässä tutkielmassa syvennytään kestopagneettimoottorille ominaisiin vikoihin. Tavoitteena on parantaa kohdeyrityksen vikadiagnostiikkaprosessia rutiinikoestuksessa, jotta moottorin viat saataisiin yksinkertaisin testein selvitettyä. Tutkimuskirjallisuuden avulla selvitetään erinäisiä kestopagneettimoottorin vikoja, jotka voidaan jakaa magneettisiin, sähköisiin sekä mekaanisiin vikoihin. Tutkielmassa esitetty vikojen selvittäminen vastaa tutkielman ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Toisessa tutkimuskysymyksessä haluttiin selvittää, että onko kohdeyrityksen moottorien koestuspaikalla olevilla välineillä mahdollista löytää kestopagneettimoottorin valmistuksessa tapahtuvia vikoja. Kolmantena tutkimuskysymyksessä tavoitteena oli miettiä, miten tulosten perusteella voidaan luoda vianhakuprosessi tuotannolle vikojen löytämiseksi. Mahdollisuutena oli luoda joko vikapuu tai vianhakutaulukko, joiden perusteella diagnoosi tietystä viasta on mahdollista tehdä. Tarkoituksena oli myös pohtia, että kuinka tarkasti vika tulisi diagnosoida, vai riittäisikö vain vian havainnointi staattorista tai roottorista, jolloin rutiinikoestajan toimenpiteenä olisi tilata uusi roottori tai staattori.

Toisen ja kolmannen tutkimuskysymyksen vastauksien saavuttamiseksi tässä diplomityössä testattiin erästä kestopagneettiprototyypistä. Tällä moottorityypille oli mahdollista aiheuttaa eri kestopagneettimoottorin vikoja, kuten kytkentävikoja sekä magneettien asennusvirheitä. Moottorin suoritusarvoja mitattiin eri vikatilanteissa, ja näistä mitatuista arvoista pyrittiin etsimään piirteitä, joiden avulla moottorille voidaan diagnosoida vika.

Tutkimuksessa havaittiin, että testatulla moottorilla roottoriviat lisäävät roottorin pyörimisnopeuden monikertoja jännitespektrissä. Tämä ilmiö on kuitenkin havaittu useassa eri tutkimuksessa, muun muassa Zafaranin (2018) väitöskirjassa. Etenkin pyörimisnopeuden seitsemäs monikerta kasvoi merkittävästi magneettivian vuoksi. Kirjallisuuskatsauksen avulla havaittiin myös, että tämä pätee suurimmassa osassa tapauksista kestopagneettimoottoritopologioita. Roottorimuutos ei aiheuta muutoksia osoitindiagrammiin. Roottorimuutos kuitenkin aiheuttaa muutoksia jokaisessa pääjännitteessä.

Staattoriviat aiheuttivat myös jonkin verran muutoksia vastajännite- ja staattorivirtaspektreihin. Nämä muutokset eivät desibelimilliwattiasteikolla olleet kuitenkaan lähelkään yhtä merkittäviä, kuin roottorivikojen tapauksessa. Aiheutetut staattoriviat kuitenkin merkittävästi lisäsivät vaihe-eroa ja jännitteenalenemaa osoitindiagrammissa sekä pääjännitteissä verrattuna ehjään tilanteeseen. Osoitindiagrammi olikin merkittävä tekijä erottamaan nämä kaksi vikatyyppeä.

Osoitindiagrammi havaittiin hyväksi menetelmäksi erittelemään vika roottori- ja staattorivikojen välillä. Tutkielman tuloksena syntyneessä vikapuussa osoitindiagrammin käyttö onkin olennaisessa osassa vian löytämistä. Jännitespektrin tiettyjen komponenttien kasvua voidaan käyttää löytämään magneettivika. Tätä ei kuitenkaan ole lisätty syntyneeseen vikapuuhun. Osoitindiagrammin käyttö verrattuna jännite- ja virtaspektreihin on visuaalisempaa ja käyttöönotto helpompaa. Jos haluttaisiin käyttää jännitespektrejä, pitäisi koestajan ymmärtää etsiä oikeat pyörimiskertojen monikerrat. Osoitindiagrammin käytössä riittää ymmärtää, että diagrammi poikkeaa symmetrisestä tapauksesta.

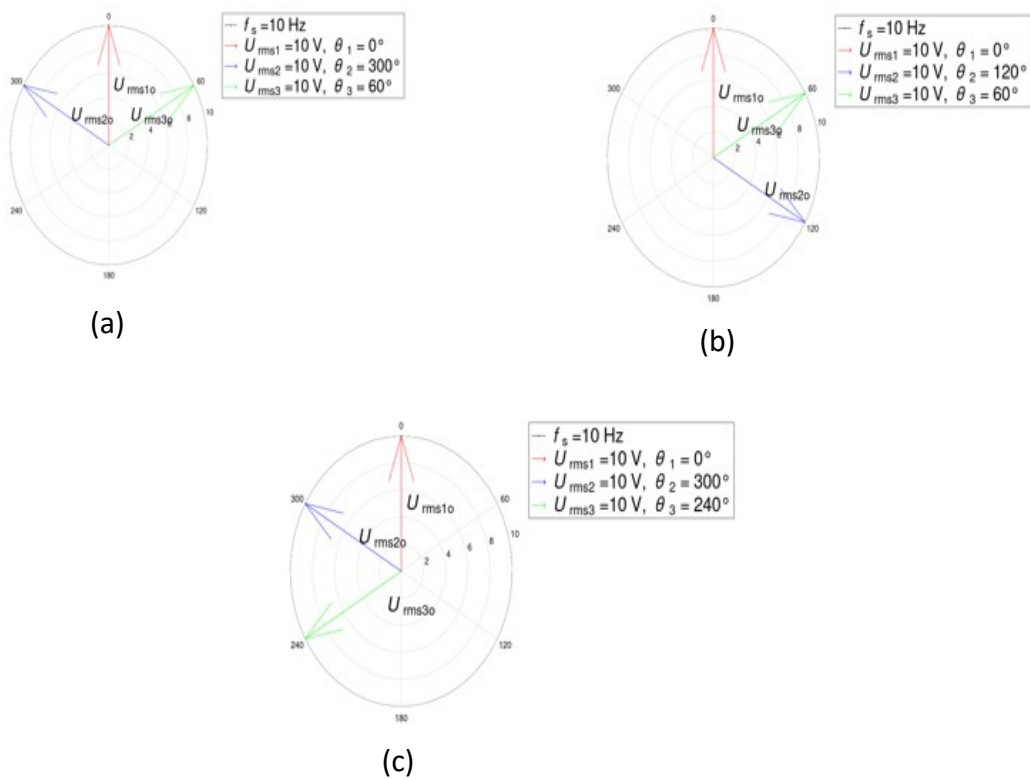
Tutkielman perusteella voidaan todeta, että kohdeyrityksen koestuspaikan välineet ovat riittävät löytämään kestopagneettimoottorille ominaisia vikoja. Mittaustulosten perusteella on myös mahdollista muodostaa looginen prosessi vikojen löytämiseksi. Sen lisäksi voidaan todeta, että vikojen löytäminen ei ole prioriteetti, vaan seuraava koestajan toimenpide. Päätös uuden staattorin ja roottorin tilaamisesta voidaan tehdä ilman, että tiedetään mikä vika roottorissa tai staattorissa tarkalleen on. Tärkeintä on vain diagnosoida, että onko vika roottorissa tai staattorissa.

Jatkotutkimusmahdollisuuksia

Tutkielma lisää sähkömoottorin tuotantoprosessin vikadiagnoosiin liittyvää jatkotutkimustarvetta. Tässä moottorissa oli yhteensä kuusi kaapelia: sisääntulo ja ulostulo jokaiselle vaiheelle. Moderneimmissa staattoritopologioissa sisäistä kytkentää voi muuttaa yhden vaiheen välistä, jolloin kaapeleita koko moottorissa on 12. Tällöin staattori voidaan kytkeä useammalla tavalla väärin kytkentäterminaalilla, mikä aiheuttaa muutoksia osoi-

tindiagrammiin. Näiden kytkentävikojen dokumentointi on jatkotutkimusten aihe. Tutkimusta voitaisiin käyttää helposti erottelemaan vika kytkentävian ja staattorin sisäisten vikojen välillä.

Kuvassa 83 on esitetty näkymä oskilloskoopissa, kun yksi vaihe on käännetty väärinpäin. Oskilloskooppi ottaa aina ensimmäisen vaiheen vaihekulmaksi nolla astetta, näkymä on hyvin erilainen riippuen mikä vaihe on väärinpäin.

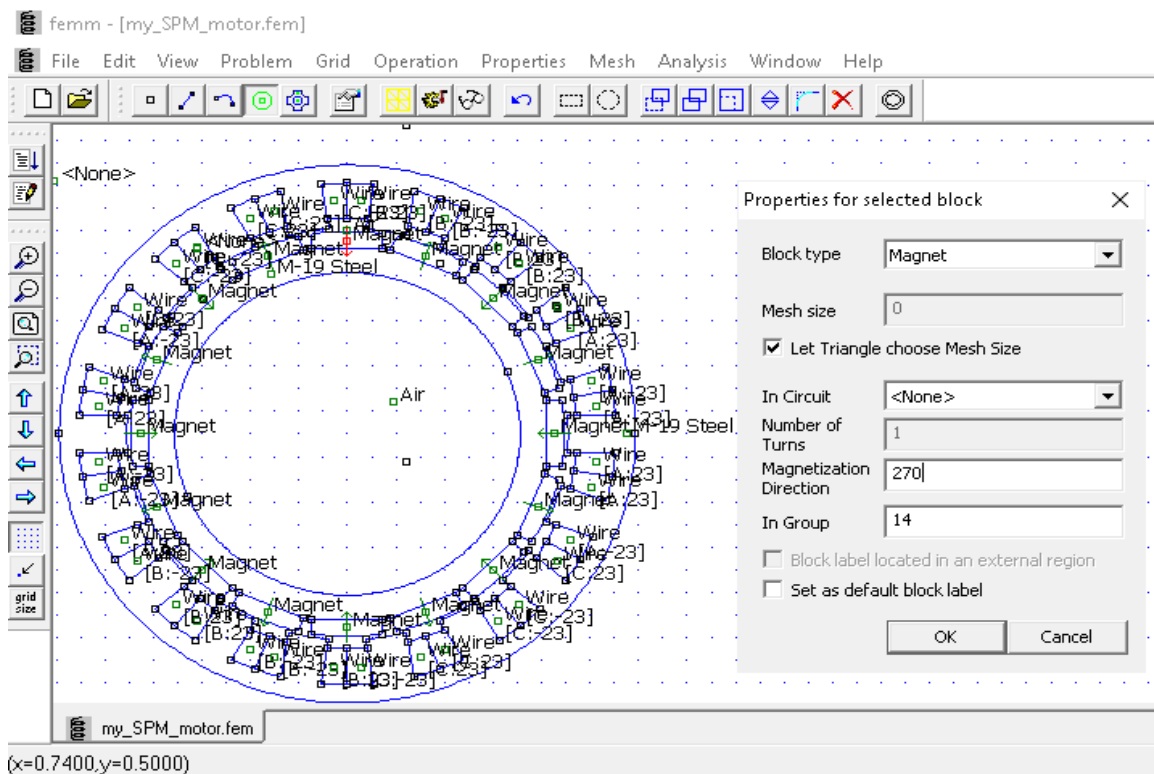


Kuva 83. Osoitindiagrammi, kun U-vaihe on käännetty väärinpäin (a), W-vaihe on käännetty väärinpäin (b), V-vaihe käännetty väärinpäin (c) moottorin terminaalilla.

Tutkielmassa myös todetaan kirjallisuuskatsaukseen perustuen, että staattori- ja roottorivikojen näkyminen riippuu todella paljon moottorin topologiasta, etenkin magneettivian tapauksessa. Yksi ratkaisu helpottamaan vikojen selvittämistä onkin erinäisen vikalaskentaprofiilin luominen kohdeyrityksen simulointiympäristö Adeptiin. Tällöin voitaisiin laskea moottorin suoritusarvoja vikatilanteessa, esimerkiksi vastajännitespektriin

syntyvät vikataajuudet ja osoitindiagrammi jokaiselle vikatilanteelle erikseen jo moottorin suunnittelun aikana. Tästä voisi tulla esimerkiksi tiedosto rutiinikoestajille jokaiselle kaupalle, milloin vika voidaan löytää jokaiselle yksittäiselle moottorille.

Kuvassa 84 on kuvakaappaus elementtimenetelmäohjelmisto FEMMistä (engl. Finite Element Magnetic Method), jossa on erään kestopagneettimoottorin magneetin ominaisuuksien määrittely. Kohdeyritys käyttää ohjelmistoa moottorin geometrian ja materiaalien määrittelyyn. Kuten kuvasta on havaittavista, esimerkiksi magneetin kääntö väärinpäin on todella helppoa. Se onnistuu muuttamalla magneetin orientaatiota 180 astetta kohdassa *Magnetization Direction*. Adeptilla olisi mahdollista luoda käyttöliittymä, jossa esimerkiksi tiettyä valintaruutua painamalla voitaisiin aiheuttaa demagnetaatio, tai kääntää magneetti väärinpäin. Tällöin saataisiin todella tarkat tulokset vikojen vaikutuksesta moottorin suoritusarvoihin, kuten vääntömomenttiin ja vastajännitteeseen.



Kuva 84. Näkymä FEMM:in magneetin ominaisuuksien määrittelystä.

Lähteet

- ABB. (2019). *Low voltage motors – Motor guide*. Noudettu 2022-3-24 osoitteesta https://library.e.abb.com/public/1fd380f8ca8b4934ae3fa609d764fd33/21043_ABB_Motor_Guide_REV_D.pdf
- Aho T. (2007). Electromagnetic design of a solid steel rotor motor for demanding operation environments [väitöskirja, Lappeenrannan yliopisto]. *Acta Universitatis Lappeenrantaensis*. Noudettu 6.6.2023 osoitteesta <https://lutpub.lut.fi/handle/10024/31124>
- Alawady, A. A., Yousof, M. F. M., Azis, N., & Talib, M. A. (2020). Phase to phase fault detection of 3-phase induction motor using FRA technique. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. [Verkkoaineisto]. 11: 3, 1241–1248. Saatavissa: <https://doi.org/10.11591/ijpeds.v11.i3.pp1241-1248>
- Bhuiyan, E. A., Akhand, Md. M. A., Das, S. K., Ali, Md. F., Tasneem, Z., Islam, Md. R., Saha, D. K., Badal, F. R., Ahamed, Md. H., & Moyeen, S. I. (2020). A Survey on Fault Diagnosis and Fault Tolerant Methodologies for Permanent Magnet Synchronous Machines. *International Journal of Automation and Computing*. 17: 6, 763–787. Saatavissa: <https://doi.org/10.1007/s11633-020-1250-3>
- Butov, A., & Verl, A. (2014). Comparison of end of line tests for serial production of electric motors in hybrid truck applications. *4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, 1–4. [Verkkoaineisto] IEEE. <https://doi.org/10.1109/edpc.2014.6984405>.
- Chen, Y., Liang, S., Wanfu, Li., Liang, H., & Wang, C. (2019). Faults and Diagnosis Methods of Permanent Magnet Synchronous Motors: A Review. *Applied Sciences*. [Verkkoaineisto]. 9: 10, 2116. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/app9102116>.
- Coenen, I., van der Giet, M., & Hameyer, K. (2012). Manufacturing Tolerances: Estimation and Prediction of Cogging Torque Influenced by Magnetization Faults. *IEEE Transactions on Magnetics*. [Verkkoaineisto]. 48: 5, 1932–1936. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/tmag.2011.2178252>
- Csanyi, E. (2020, 21. joulukuuta). *Troubleshooting the most typical winding problems of three phase electric motors*. Electrical Engineering Portal. Noudettu 24.4.2023

osoitteesta <https://electrical-engineering-portal.com/troubleshooting-winding-problems-three-phase-electric-motors#open-winding>

- Dhifli, M., Ennassiri, H., Amara, Y., & Barakat, G. (2016). Impact of the airgap magnetic field harmonics on the performances of a disc type flux switching machine for wind application. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. [Verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/icelmach.2016.7732862>
- Dong, J., Huang, Y., Jin, L., & Lin, H. (2016). Comparative Study of Surface-Mounted and Interior Permanent-Magnet Motors for High-Speed Applications. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. [Verkkoaineisto]. 26: 4, 1–4. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/tasc.2016.2514342>
- Du, B., Wu, S., Han, S., & Cui, S. (2016). Interturn Fault Diagnosis Strategy for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor of Electric Vehicles Based on Digital Signal Processor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. [Verkkoaineisto]. 63: 3, 1694–1706. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/tie.2015.2496900>
- Dumont, C., Gilson, A., Kluyskens, V., Espanet, C., & Dehez, B. (2017). Evaluation of the electrodynamic forces in high-speed permanent magnet machines with rotor eccentricity. *Mechanical Engineering Journal*. 4: 5, 1–4. <https://doi.org/10.1299/mej.17-00072>
- Faiz, J., & Exiri, S. A. H. (2015). Short-circuit fault diagnosis in permanent magnet synchronous motors- an overview. *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines & Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical & Electronic Equipment (OPTIM) & 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)*. [Verkkoaineisto]. 18–27. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/optim.2015.7427038>
- Faiz, J., & Nejadi-Koti, H. (2016). Demagnetization Fault Indexes in Permanent Magnet Synchronous Motors—An Overview. *IEEE Transactions on Magnetics*. [Verkkoaineisto]. 52: 4, 1–11. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2015.2480379>

- Faiz, J., Nejadi-Koti, H. and Valipour, Z. (2017), Comprehensive review on inter-turn fault indexes in permanent magnet motors. *IET Electric Power Applications*. [Verkkoaineisto]. 11: 4, 142–156. Saatavissa: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0196>
- Fitouri, M., Bensalem, Y., & Naceur Abdelkrim, M. (2018). Effects of Design Variables on Demagnetization Fault in Permanent Magnet Synchronous Motor. *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*. [Verkkoaineisto]. 71–76. Saatavissa: <https://doi/10.1109/SSD.2018.8570605>.
- Flett, F. (1994). *A Tutorial in AC Induction and Permanent Magnet Synchronous Motors, Vector Control with Digital Signal Processors*. Massachusetts: Analog Devices.
- Haddad, R, Z, S. (2016). *Fault detection and identification in Permanent magnet synchronous machines*. [väitöskirja, sähkötekniikka, Michiganin valtionyliopisto]. Michigan. Digital Repository. Noudettu 26.9.2023 osoitteesta <https://d.lib.msu.edu/etd/4395>.
- Halmesmäki, W. (2010). Oikosulkumoottorin laatuvirheiden jäljittäminen koestustulosten perusteella. Diplomityö. Sähkötekniikka, Vaasan yliopisto. Saatavissa: <http://osuva.uwasa.fi/handle/10024/7002>.
- Hang, J., Zhang, J., & Cheng, M. (2016). Detection and Discrimination of Open Phase Fault in Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System. *IEEE Transactions on Power Electronics*. [Verkkoaineisto]. 31: 7, 4697-4709 Saatavilla: <https://doi.org/10.1109/tpel.2015.2479399>
- Hayes, J. G., & Goodarzi, G. A. (2018). *Electric powertrain: Energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles*. John Wiley & Sons.
- HBK Electric Power Testing. (2022). Electric Motor Back EMF Testing for End of Line Production - Lightboard Intro. *Youtube*. [Verkkoaineisto]. 2021.03.26 [Viitattu 29.7.2023]. Saatavissa: <https://www.youtube.com/watch?v=5Lw8D0J4L2I>
- Heins, G., Brown, T., & Thiele, M. (2011). Statistical Analysis of the Effect of Magnet Placement on Cogging Torque in Fractional Pitch Permanent Magnet Motors. *IEEE Transactions on Magnetics*. [Verkkoaineisto]. 47: 8, 2142–2148, <https://doi.org/10.1109/tmag.2011.2125795>

- Horizon Technology. (2023, 24. syyskuuta). *SOMALOY 700: Electromagnetic component design optimized at last*. Noudettu 2023-9-25 osoitteesta <https://li-vehv.com.au/high-voltage-condition-assessment/machines-motors-generators/>
- Infineon Technologies. (2022). *Permanent magnet synchronous motor (PMSM)*. Noudettu 2023-3-23 osoitteesta <https://www.infineon.com/cms/en/applications/solutions/motor-control-and-drives/permanent-magnet-synchronous-motor/?msclkid=baadb240c49b11eca826d8ff49c669e0>
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (2015). *IEEE Trial-Use Guide for Testing Permanent Magnet Machines*. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers. 1–56. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/ieeestd.2015.7047988>
- Ishikawa, T., Seki, Y., & Kurita, N. (2013). Analysis for Fault Detection of Vector-Controlled Permanent Magnet Synchronous Motor with Permanent Magnet Defect. *IEEE Transactions on Magnetics*. [Verkkoaineisto]. 49: 5, 2331–2334. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/tmag.2013.2243135>
- Jordan, S. (2018). ABB Motor - Initial Motor Pre-Design - Document No. 2018/008. Rev. 2. *Höganäs*. [Rajattu pääsy, verkkoaineisto]. 2018-05-18. [Viitattu 10.8.2023].
- KaiHung Machinery. (2020, 14. syyskuuta). *Automatic Rotor Magnet Gluing and Assembly Machine*. KaiHung. Noudettu 26.6.2023 osoitteesta http://www.kaihung.com/en/?act=shopping&cmd=detail&pi_id=2016072600057
- Kerszenbaum, I., & Klempner, G. (2004). *Operation and Maintenance of Large Turbo-Generators*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Khan, M.S., & Okonkwo, U.V., Usman, A., & Rajpurohit, B.S. (2018). *Finite Element Modeling of Demagnetization Fault in Permanent Magnet Direct Current Motors*. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 1-5. <https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8586622>.
- Kolehmainen, J., & Ikaheimo, J. (2008). Motors With Buried Magnets for Medium-Speed Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*. [Verkkoaineisto]. 23: 1, 86–91. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/tec.2007.914331>.

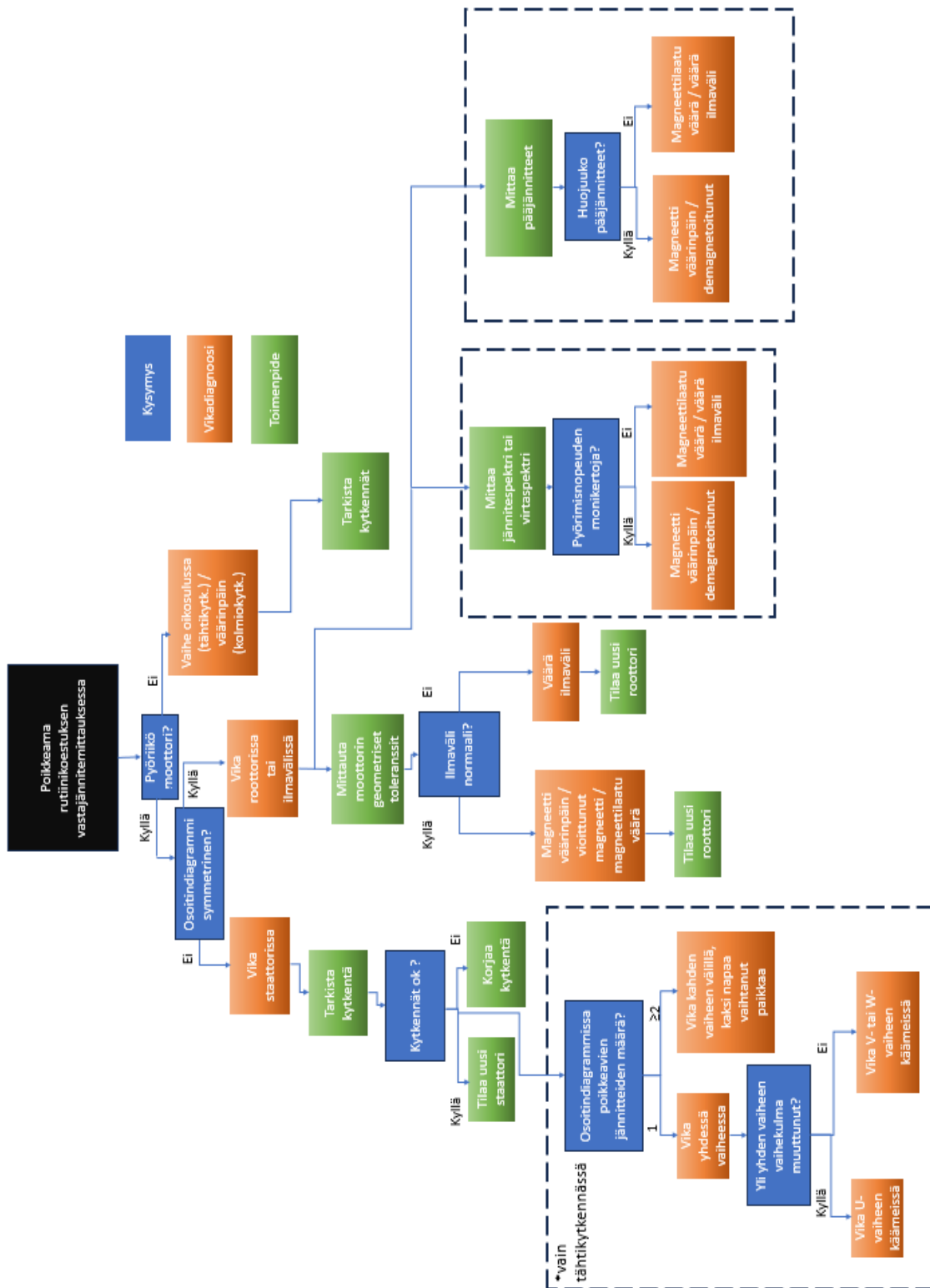
- Kosatsky, Tom (2013). Radiofrequency Toolkit for Environmental Health Practitioners (PDF). *British Columbia Centre for Disease Control*. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://www.bccdc.ca/resource-gallery/Documents/Educational%20Materials/EH/Radiofrequency-Toolkit.pdf#page=14>
- Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2013). *Analysis of electric machinery and drive systems*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Kuusisto, J. (2012). Ohje sähkömoottorin rutiinikoestusarvojen laskentaan. Insinööriyö . Sähkötekniikka, Vaasan ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201205148003>
- Le Doeuff, R., & El Hadi Zaïm, M. (2010). *Rotating Electrical Machines*. London: Wiley-ISTE.
- LiveHV. (2023). *Machines – Motors & Generators*. Noudettu 2022-5-12 osoitteesta <https://livehv.com.au/high-voltage-condition-assessment/machines-motors-generators/>
- Mishra, A., & Agarwal, P., & Srivastava, S. (2014). A comprehensive analysis and implementation of vector control of permanent magnet synchronous motor. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 5. 1–23. <https://doi.org/10.1504/ijpec.2014.059982>.
- Mohammed, S., Muhammad, B., Muhammad, M., & Babangida, A (2023). Design and construction of practical module for star delta starter of an induction motor. 7th *International Aegean Conferences on Innovation Technologies & Engineering*. [Verkkoaineisto]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/371058357_DESIGN_AND_CONSTRUCTION_OF_PRACTICAL_MODULE_FOR_STAR_DELTA_STARTER_OF_AN_INDUCTION_MOTOR
- Nasar, S. (1997). *Schaum's Outline of Electric Machines & Electromechanics*. 2nd ed. New York: McGraw & Hill.
- Nema. (2013). *Motor training*. Noudettu 2022-3-25 osoitteesta <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/08/f2/DOE%20Navigant%20Master%20Presentation.pdf>

- Norgren. (2023). *What is electric motor?* Noudettu 2023-5-12 osoitteesta <https://www.norgren.com/en/support/blog/what-is-an-electric-motor>
- Pantti, Tommi. (2018). *Rutiinikoestus kestomagneettimoottoreille*. [Verkkoaineisto, sisäinen ohje, rajattu pääsy]. IMS ABB.
- Pietrzak, P., & Wolkiewicz, M. (2023). Demagnetization Fault Diagnosis of Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Stator Current Signal Processing and Machine Learning Algorithms. *Sensors* 2023. [Verkkoaineisto]. 23: 4, 1757–1783. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/s23041757>
- Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2014). *Design of rotating electrical machines* (Second edition.). New Jersey: John Wiley & Sons.
- Rayner, R. (1995). *The Pump Users Handbook* (Fourth Edition). Elsevier Science. 729s.
- Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, Part I. (1985). *IEEE Transactions on Industry Applications*. IA-21: 4, 853–864. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <https://doi.org/10.1109/tia.1985.349532>
- Seppälä, J. (2014). Oikosulkumoottorin tuotannaikaisten vikojen korjausopas. Insinööriyö. [Verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201405147806>
- Song, T., Zhang, Z., Liu, H. & Hu, W. (2019), Multi-objective optimisation design and performance comparison of permanent magnet synchronous motor for EVs based on FEA. *IET Electric Power Applications*, 13: 1157–1166. Saatavissa: <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2019.0069>
- Stack, J.R., Harley R. G., & Habetler, T. G. (2004). An amplitude Modulation detector for fault diagnosis in rolling element bearings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. [Verkkoaineisto] 51:5 1097–1102. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.834971>
- Stone, G., Culbert, I., Boulter, E. A., & Dhirani, H. (2014). *Electrical Insulation for Rotating Machines: Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*. New Jersey: John Wiley & Sons.

- Stone, G., & Kapler, J. (1998). Stator winding monitoring. *IEEE Industry Applications Magazine*. 4:5, 15–20. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/2943.715501>
- Tavner, P.J.. (2008). Review of condition monitoring of rotating electrical machines. *Electric Power Applications, IET*. [Verkkoaineisto]. 2: 4, 215–247. Saatavissa: <https://doi.org/10.1049/iet-epa:20070280>
- Thamke, P.W., Yewale, N.M., Vaidya, U.B., & Asutkar, P.G. (2015). Faults Associated with Permanent Magnet Synchronous Motor. *International Journal of Core Engineering & Management (IJCEM)* 2: 3, 211–217.
- Usman, A., Joshi, B. M., & Rajpurohit, B. S. (2017). Review of fault modeling methods for permanent magnet synchronous motors and their comparison. *IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. [Verkkoaineisto]. 141–146 Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/demped.2017.8062347>
- Wang, A., Jia, Y., & Soong, W. L. (2011). Comparison of Five Topologies for an Interior Permanent-Magnet Machine for a Hybrid Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Magnetics*. [Verkkoaineisto]. 47: 10, 3606–3609. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/tmag.2011.2157097>
- Wang, H., & Leng, J. (2018). Summary on development of permanent magnet synchronous motor. *2018 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, 689–693. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407219>.
- Yamada, A., & Miki, I. (2014). New permanent magnet synchronous motor with reduced rare earth magnets. *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. [Verkkoaineisto]. 391–396. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/icems.2014.7013502>
- Zafarani, M. (2018). Condition monitoring techniques for permanent magnet synchronous motors [väitöskirja, sähkötekniikka, Texasin yliopisto]. *Texas Digital Library*. Noudettu 6.6.2023 osoitteesta <https://utd-ir.tdl.org/bitstream/handle/10735.1/6297/ETD5608-013-ZAFARANI-8568.46.pdf?sequence=6&isAllowed=y>

Zheng, J. Q., Zhao, W. X., Ji, J. H., & Liu, G. H. (2015). Design and comparison of interior permanent-magnet machines for hybrid electric vehicles. *2015 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD)*. [Verkkoaineisto]. 3606–3609. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/asemd.2015.7453551>

Liite



Kuva 85. Vikapuu kestopermanenttimoottorin rutiinikoestukseen