Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Leevi Laiho

Voltti-ampeeri-vastusmittauksen hyödyntäminen kolmivaihemoottoreiden vaihevastusmittauksissa ABB IEC LV Motorsin koekentällä

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen
akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tekijä: Leevi Laiho
Tutkielman nimi: Voltti-ampeeri-vastusmittauksen hyödyntäminen kolmivaihemoottoreiden vaihevastusmittauksissa ABB IEC LV Motorsin koekentällä
Tutkinto: Tekniikan kandidaatti
Koulutusohjelma: Sähkö- ja energiatekniikka
Opintosuunta: Energiatekniikka
Työn ohjaaja: Anne Mäkiranta
Valmistumisvuosi: 2026 **Sivumäärä:** 26

TIIVISTELMÄ:
Tämä kandidaatintutkielma on tehty ABB Oy:n toimeksiannosta. Työssä käsitellään sähkömoottorien vaihevastusmittauksen automatisointia volttiampeerimenetelmää hyödyntäen ABB IEC LV Motorsin koekentällä. Tavoitteena on tehostaa koestusprosessia, parantaa työturvallisuutta ja parantaa koestuksen laatua korvaamalla nykyinen manuaalinen mittausmenetelmä. Manuaalinen mittaus on hidas ja työturvallisuuden kannalta riskialtis työvaihe. Manuaalisessa mittauksessa voi käydä inhimillisiä virheitä, kun työskennellään kiireellisissä aikarajoissa.

Työn kirjallisessa osassa käydään läpi vastusmittauksen ominaisuuksia ja vertaillaan eri menetelmien heikkouksia ja vahvuuksia. Perehdytään tyyppitestausprosessiin ja jäähtymäkäyrän mittaukseen osana tyyppitestausta. Arvioidaan menetelmiä työturvallisuuden ja työmäärän perusteella. Selvitetään mahdollisuutta toteuttaa automaattinen vastusmittaus ja mahdollisia siihen liittyviä ongelmia.

Työn kokeellisessa osassa testattiin vaihevastuksien mittaamista nelijohdinperiaatteella. Tarkoituksena oli selvittää nelijohdinmenetelmän tarkkuutta manuaaliseen mittaukseen verrattuna. Mittausjärjestelyssä hyödynnettiin Fluke Norma 5000-tehoanalysaattoria ja erillistä tasajännitelähdettä. Tuloksia verrattiin koekentän käyttämään ja kalibroituun Cropico DO5000-mikroohmimittariin.

Tulokset osoittavat, että ehdotetulla menetelmällä saavutetaan luotettava mittaustarkkuus. Volttiampeerimenetelmän ja referenssimittauksen tulosten ero oli käytännön sovelluksien kannalta merkityksetön. Työ osoittaa, että siirtyminen automaattiseen mittaustapaan on järkevä vaihtoehto. Esitetyt haasteet kuten integrointi osaksi MotLab-ohjelmistoa ja automaatiota sekä mittauskaapelointi ja mittausvirran syöttö pitää saada ratkaistua järkevästi.

AVAINSANAT: sähkömoottori, resistanssi, nelijohdinmittaus, volttiampeerimenetelmä, automaatio

1 Johdanto 5

2 Vastusmittaus osana kolmivaihemoottorien testaamista 7

2.1 Yleistä 7

2.2 Manuaalinen vastusmittaus 9

2.3 Manuaalisen vastusmittauksen ominaisuudet 10

3 Automatisoitu vastusmittaus 12

3.1 Perustelut automaattiselle vastusmittaukselle 12

3.2 Haasteet automaattisessa vastusmittauksessa 13

4 Mittausjärjestelyn testaaminen 15

4.1 Testauslaitteisto 15

4.2 Mittaustulokset 19

5 Pohdinta 21

6 Johtopäätökset 23

7 Yhteenveto 25

Lähteet 26

Kuvat

Kuva 1. Cropico DO5000-mikro-ohmittari. 10

Kuva 2. Mittauskytkentä moottorin navoilla. 16

Kuva 3. Mittauskytkennän piirikaavio. 16

Kuva 4. Fluke Norma 5000-mittarin kytkennät. 17

Kuva 5. Bremi BRS 64-jännitelähde. 18

Taulukot

Taulukko 1. Kolmivaihemoottorien eristysluokat (IEC 60034-1). 8

Taulukko 2. Cropico DO5000-mittarin mittaustarkkuudet. 11

Taulukko 3. Mittausvirran ja -jännitteen mitatut arvot. 19

Taulukko 4. Mitattujen vastuksien vertailu laskettuihin vastuksiin. 19

Lyhenteet

AC	engl. alternating current, vaihtovirta
DC	engl. direct current, tasavirta
FS	engl. full scale, mittausalueen täysi arvo
IEC	engl. International Electrotechnical Commission, kansainvälinen sähkötekninen komissio
IEEE	engl. Institute of Electrical and Electronics Engineers, sähkö- ja elektroniikkainsinöörien järjestö
Rdg	engl. reading, lukema (mittalaitteen näyttämä arvo)
U, V, W	kolmivaiheisen sähkömoottorin vaiheiden tunnuskirjaimet

1 Johdanto

Kolmivaihemoottorien vaihevastusmittaukset ovat tärkeä osa koekentällä suoritettavaa koestusprosessia. Moottoreille suoritettavia vaihevastusmittauksia hyödynnetään moottorien laadun valvomiseen ja tyyppitesteissä käämien lämpenemän laskemiseen. Nykyisessä järjestelyssä vaihevastusmittaukset suoritetaan manuaalisesti kiinnittämällä vastusmittari hauenleukaliittimillä eli ”ns. hauenleuat” moottorin napoihin. Manuaalisesta mittauksesta koituu turvallisuusongelmia, suurempi työkuorma ja mahdollisia mittausepätarkkuuksia. Vaihtoehtoisen kaksijohdinmittauksen haasteena on erityisesti testipenkin pitkien syöttökaapeleiden resistanssi ja liitosten laatu. Kaksijohdinmittauksessa nämä ulkoiset resistanssit lisääntyvät mitattavaan vaihevastukseen, aiheuttaen virheen lopputulokseen. Tämä virhe korostuu varsinkin, kun mitattavan moottorin vaihevastus on hyvin pieni.

Tällä tutkielmalla selvitetään mahdollisuutta toteuttaa moottorien vaihevastusmittaukset volttiampeerimenetelmällä. Menetelmässä hyödynnetään erillistä virtalähdettä ja jo ennestään käytössä olevia FLUKE NORMA-tehoanalysaattoreita. Tämä mittaustapa perustuu nelijohdinmittaukseen. Syöttämällä virta testipenkin omien syöttökaapeleiden kautta ja mittaamalla jännite erillisillä, suoraan moottorin napoihin kytkettävillä mittajohdoilla, pystytään poistamaan syöttöpiirin ja kontaktien aiheuttama jännitehäviö mittaustuloksesta. Näin saadaan tarkempia ja luotettavampia mittauksia.

Työssä vastattavat tutkimuskysymykset ovat:

- Miten volttiampeerimenetelmällä saavutettu mittaustarkkuus vertautuu nykyiseen mittaustapaan?
- Mitä haasteita volttiampeerimenetelmän käyttöönottoon liittyy?
- Onko automaattiseen vastusmittaukseen siirtyminen perusteltua?

Tutkielman toisessa luvussa käsitellään vastusmittauksen roolia osana koekentällä suoritettavia tyyppitestejä ja manuaalisen mittaustavan heikkouksia. Kolmannessa luvussa

perehdytään automaattisen vastusmittauksen ominaisuuksiin, vahvuuksiin, heikkouksiin ja haasteisiin. Lisäksi luvussa perustellaan siirtymistä automaattiseen vastusmittaukseen eri näkökulmista. Neljännessä luvussa suorittiin työn kokeellinen osuus, jossa mittausjärjestelmän prototyyppiä testattiin käytännössä. Luvussa esitellään kytkentäjärjestelyt, käytetyt mittalaitteet ja analysoidaan saatuja mittaustuloksia.

2 Vastusmittaus osana kolmivaihemoottorien testaamista

Tässä kappaleessa käsitellään vaihevastusmittauksen merkitystä ja teoriaa osana sähkömoottorien tyyppitestausta. Tärkeimmät mittauksia määrittävät tekijät ovat eri tahojen määräämät standardit, joilla pyritään varmistamaan mittausprosessien yhteneväisyys ja laatu. Käydään läpi nykyistä manuaalista mittausmenetelmää ja siihen liittyviä riskejä kuten työturvallisuus ja fyysinen rasitus.

2.1 Yleistä

Moottoreille suoritettavissa tyyppitesteissä suoritetaan aina ensimmäisenä vastusmittaus kylmälle eli ympäristönlämpöiselle moottorille. Koekentällä mitattuja arvoja voidaan sen jälkeen verrata tuotannon linjalla mitattuihin arvoihin. Tällöin voidaan varmistua, että moottoriin on kytketty oikea kytkentä testiä varten. Mitatuista vastusarvoista tarkistetaan, että ne eivät poikkea liikaa toisistaan. Suurin sallittu vaihevastuksien keskimääräinen poikkeama kylmävastusarvoille on 6 %.

Tyyppitestin vastusmittauksien toinen osa on jäähtymäkäyrän mittaaminen. Tätä varten moottorille on tehty lämpöajo nimelliskuormalla. Tämä tarkoittaa, että moottori on ollut testipenkissä kiinni jarrumoottorissa, joka on kuormittanut testattavaa moottoria nimellismomentilla. Lämpöajon kesto riippuu moottorin nimellisnopeudesta, taajuudesta, tehosta ja sen koosta eli massasta. Isommat, vähemmän tehokkaat ja hitaammin pyörivät moottorit lämpenevät hitaammin. Kun moottorin lämpötila on tasoittunut niin, että lämpötila on noussut viimeisen 30 minuutin aikana korkeintaan 1 celsiusasteen, voidaan aloittaa jäähtymäkäyrän mittaus.

Jäähtymäkäyrän mittaus alkaa siitä hetkestä, kun moottorilta kytketään jännitteet pois. Vaihevastuksen arvo mitataan ajanhetkillä 30-, 45-, 60-, 75-, 90-, 120-, 150-, ja 180 sekuntia. 6 ensimmäistä pistettä mitataan vaiheväliltä U-W ja 2 viimeistä väleiltä U-V ja V-W tässä järjestyksessä. Mittauspisteiden avulla ABB:n mittausohjelma MotLab extrapoloi

vaihevastuksen arvon hetkelle 0 s, josta saadaan selville lopullinen lämpenemä. Lämpenemän avulla varmistetaan, että moottori joko saavuttaa halutun eristysluokan tai se siirretään korkeampaan luokkaan. Moottorin eristysluokkien rajat on määritelty kansainvälisessä IEC 60034-1 standardissa. Standardissa on määritelty suurin sallittu lämpenemä ja maksimilämpötilat.

Taulukko 1. Kolmivaihemoottorien eristysluokat (IEC 60034-1).

Eristysluokka	Maksimilämpötila (°C)	Sallittu lämpenemä (K)
A	105	60
E	120	75
B	130	80
F	155	105
H	180	125

Taulukossa 1 IEC 60034-1 standardin määrittelemät rajat moottorien lämpötilalle ja lämpenemälle. Suurin sallittu lämpötila riippuu lämpenemän lisäksi ympäristön lämpötilasta. Moottorin lämpenemän tarkka määrittäminen on tärkeää, jotta tiedetään oikea eristysluokka. Eristysluokat ovat tärkeitä moottorin käyttökohteen kannalta, jotta voidaan valita sopiva moottori tiettyihin olosuhteisiin. Eatonin (n.d.) mukaan lämpötila vaikuttaa olennaisesti moottorin elinkaareen ja 44 % moottoreiden hajoamisista liittyvät lämpötilaan. Eatonin mukaan jokainen 10°C ylitys maksimilämpötilan yli puolittaa moottorin käyttöiän. Moottorin käyttöiän lyheneminen taas kasvattaa kokonaiskustannuksia koska se joudutaan korvaamaan uudella moottorilla useammin. Tämän takia lämpenemän määrittäminen mahdollisimman tarkasti on tärkeää.

Lisäksi tyyppitestissä mitataan vaihevastukset osakuormatestin jälkeen ja ennen ja jälkeen tyhjäkäyntitestin, jotta voidaan seurata käämityksen lämpenemää testin edetessä.

2.2 Manuaalinen vastusmittaus

Manuaalisessa vastusmittauksessa koestaja kytkee vastusmittarin johdot hauenleuoilla moottorin navoille. Tämän jälkeen pitää valita oikea mittausalue, jotta mittausvirta ja mittaustarkkuus ovat sopivalla alueella. Tämän jälkeen mittaus pitää käynnistää vastusmittarilta ja odottaa vastusarvon tasaantumista. Kun mittarin näytöllä näkyvä vastusarvo on tasaantunut, koestaja kirjaa arvon paperille. Tämän jälkeen mittarin mittaus pitää pysäyttää, siirtää hauenleuat toiselle vaihevälille ja käynnistää mittaus uudelleen. Paperille kirjaus vie aikaa ja arvojen siirtäminen mittausohjelmistoon altistaa näppäilyvirheille. Lisäksi eri vaihevälit voivat helposti mennä sekaisin, jolloin yhden vaiheen arvot merkitäänkin vahingossa toiselle vaiheelle.

Jäähtymäkäyrän mittaukseen manuaalisesti kohdistuu aikataulupaine. Kun koestaja sammuttaa moottorin automaatiokoneelta, pitää hänen käynnistää sekuntikello. Sekuntikellon tarkka käynnistäminen on haastavaa koska jännite ei kytkeydy pois heti kun nappia painetaan. Arvojen lukeminen täsmälleen oikealla hetkellä mittarin näytöltä on haastavaa ja jopa 5-numeroisen luvun kirjoittaminen paperille on virhealtista. Noin 30 sekunnin aikaikkunassa pitää ehtiä kävellä mittauspisteeltä moottorille, avata mahdollinen manuaalinen erotin, avata moottorin liitäntäkotelon kansi, todeta moottorin jännitteettömyys, kytkeä ja käynnistää vastusmittari ja odottaa virran tasaantumista. Kiireinen työtahti lisää onnettomuuksien ja mittausvirheiden riskiä. Moottorien liitäntäkoteloiden kannet voivat painaa isoissa moottoreissa jopa 30 kiloa, joten niiden jatkuva nostelu eri vaiheissa on fyysisesti rasittavaa. Jännitteettömyyden toteaminen on työvaihe, joka saattaa helposti jäädä välistä kiireessä.

Vakavin riski on joutua kosketuksiin jännitteen kanssa liitäntäkoteloa avattaessa ja hauenleukoja kiinnittäessä. Sähköisku syöttökaapeleilta, joilla ei ole mitään ihmistä suojaavaa suojajärjestelmää on mahdollisesti jopa kuolettava koska moottorille syötettävä jännite voi olla jopa yli 700 volttia. Lisäksi hauenleukojen unohtaminen moottorin navoille mittauksen jälkeen voi pahimmassa tapauksessa tuhota koko mittarin, kun moottoriin kytketään uudestaan jännite.

2.3 Manuaalisen vastusmittauksen ominaisuudet

Nykyään koekentällä käytössä olevat vastusmittarit ovat mallia Cropico microhmeter DO-5000. Cropicolla hoidetaan kaikki koekentän vaihevastusmittaukset ja se on akkreditoitu eli hyväksytty käyttöön asiakkaiden toimesta. Kaikki DO-5000-mittarit lähetetään säännöllisesti kalibroitavaksi, jolloin varmistetaan niiden luotettavuus ja tarkkuus. Ajantasainen kalibrointi on etenkin asiakkaille tärkeää, jotta voidaan varmistaa mittauksien tarkkuus.

Kuva 1. Cropico DO5000-mikro-ohmittari.

Kuvasta 1 nähdään DO5000-mittarin etupuoli, jossa sijaitsee näyttö, käyttöliittymä ja mittauskaapelien kiinnitykset. DO5000-mittari toimii normaalilla verkkovirralla. Kuvassa 1 näkyvät erilliset virta- ja jännitekaapelit eli se hyödyntää nelijohdinmittausta. Kaapelien päät yhdistyvät hauenleukoihin, jotka kiinnitetään moottorin navoille. Mittari laskee jännite- ja virtamittauksen avulla vaihevastuksen arvon.

Taulukko 2. Cropico DO5000-mittarin mittaustarkkuudet.

Mittausalue	Suurin mittausvirta	Resoluutio	Tarkkuus maksimivirralla
30kΩ	100 µA	1Ω	± (0.03%Rdg+0.02%FS)
3kΩ	1 mA	100mΩ	± (0.03%Rdg+0.01%FS)
300Ω	10mA	10mΩ	± (0.03%Rdg+0.01%FS)
30Ω	100mA	1mΩ	± (0.03%Rdg+0.01%FS)
3Ω	1A	100µΩ	± (0.03%Rdg+0.01%FS)
200mΩ	10A	10µΩ	± (0.03%Rdg+0.01%FS)
30mΩ	10A	1µΩ	± (0.03%Rdg+0.01%FS)
3mΩ	10A	100nΩ	± (0.03%Rdg+0.02%FS)

Taulukosta 2 nähdään DO-5000:n mitta-alueet, mittausvirrat, resoluutio ja mittaustarkkuus. Mittaustarkkuudessa Rdg tarkoittaa mitattua vastuslukemaa ja FS mittausalueen täyttä arvoa. Arvoista nähdään, että DO-5000 on todella tarkka kaikilla mittausalueilla ja suurin virhe on alle prosentin kymmenesosa. Tämän takia DO-5000 on erinomainen mittari etenkin kylmävastusmittauksia varten, kun mittaukset voidaan suorittaa rauhassa. DO-5000 mittareissa on kuitenkin omat ongelmansa. Kuten kuvasta 1 nähdään, on 200 milliohmin mittausalue poissa käytöstä. Koekentällä havaittiin, että isoilla, yli 200 millimetrin napakorkeuden moottoreilla eräs uudempi DO-5000 mittari ei pysty syöttämään vakaata mittausvirtaa, jolloin mitattu vastuksen arvo ei pysy tasaisena. Tämä tekee 200 milliohmin alueella mitatuista tuloksista käyttökelvottomia. Osa mittareista taas toimii 200 milliohmin alueella oikein. Yksittäisien mittareiden välillä on siis eroja. Tällöin voidaan joutua käyttämään 3 ohmin aluetta, jossa mittaustarkkuus on 10 mikro-ohmin sijasta 100 mikro-ohmia. Tämä ei ole merkittävä ero tätä käyttötarkoitusta varten, mutta luo mahdollisuuden virheille, jos vahingossa käytetään 200 milliohmin aluetta. Uuden mittaustavan ei tarvitse olla yhtä tarkka kuin DO-5000:n, mutta sitä on hyvä käyttää vertailukohtana akkreditoidun statuksen ja todistetun toiminnan takia.

3 Automatisoitu vastusmittaus

Perehdytään automaattisen vastusmittauksen ominaisuuksiin ja tarjoamiin etuihin manuaaliseen mittaukseen verrattuna, joihin kuuluvat parantunut mittaustarkkuus ja työturvallisuus. Lisäksi käsitellään käyttöönottoon liittyviä teknisiä haasteita, kuten mitoitusvirran mitoitus erikokoisille moottoreille ja käytännön kytkentöjen järjestäminen erimallisille moottoreille.

3.1 Perustelut automaattiselle vastusmittaukselle

Siirtyminen automaattiseen vastusmittaukseen on perusteltua etenkin turvallisuuden, mittaustarkkuuden ja testausprosessin tehostamisen näkökulmasta. Kuten kappaleessa 2 todettiin, on manuaalisessa mittauksessa vakavimpana riskinä vaara joutua kosketuksiin jännitteen kanssa. Automaattisessa mittauksessa koestajan ei tarvitse avata moottorin kantta kesken koestusprosessin. Jännitteenmittauskaapeleiden asennus hoituu kertaluontoisesti samalla kun asennetaan moottorin syöttökaapelit. Tämä on kiireettömämpi ja helpompi tapa, jolloin jää enemmän aikaa tarkistaa jännitteettömyys. Kytkennän purkaminen hoituu testin lopettamisen yhteydessä, jolloin joka tapauksessa irrotetaan syöttökaapelit moottorilta. Näin saadaan siis minimoitua kosketukset mahdollisesti jännitteisiin osiin.

Automaattinen mittaus poistaa kokonaan työvaiheen, jossa vastusmittarin lukema täytyy kirjata paperille ja erikseen mittausohjelmaan. Tämä keventää työkuormaa ja vähentää mahdollisuutta mittausvirheisiin. Automaattinen mittaus varmistaisi, että jäähtymäkäyrä tulee mitattua joka kerta samalla tavalla eli esimerkiksi sekuntikellon käynnistämishetkessä ei olisi eroja eri koestuskertojen välillä. Yhtenäisemmät koestukset ja tulokset parantaisivat koestustoiminnan laatua.

3.2 Haasteet automaattisessa vastusmittauksessa

Automaattisen vastusmittauksen toteuttamiseen liittyy monia pieniä ja suuria haasteita. Jotta järjestelmä olisi käytännöllinen, tulee sen toimia monella eri testipaikalla. Haasteena on se, että eri testipaikoilla testataan hyvin erikokoisia moottoreita kokoluokilta, joiden napakorkeudet ovat 71–450 millimetriä. Jopa saman testipaikan sisällä moottorien kokoluokat voivat vaihdella suuresti. Moottorin koon kasvaessa vaihevastus pienenee. Suurimmissa moottoreissa vaihevastus voi olla parin milliohmin luokkaa, kun taas pienimmissä moottoreissa se voi olla muutaman ohmin luokkaa. Eri moottorien välillä voi siis olla tuhatkertainen ero vaihevastuksien suuruudessa. Jotta voidaan varmistaa tarkka mittaus suurimmille moottoreille, täytyy mittausvirran olla riittävän suuri, mutta ei myöskään liian suuri. Institute of Electrical and Electronics engineers (IEEE,2017) -standardin mukaan mittausvirran ei tulisi ylittää 15 % moottorin nimellisvirrasta. Jos mittausvirta on liian suuri, voi käämin lämpötila nousta, jolloin mitattu arvo ei ole enää tarkka. Kansainvälinen IEC 60034-2-1-standardi (International Electrotechnical Commission [IEC], 2014) ei anna tarkkaa raja mittausvirralle, mutta sen mukaan mittaus pitää suorittaa niin nopeasti, että käämin lämpötila ei ehdi muuttua mittauksen aikana. Mittauksissa käytettävän virtalähteen tulisi siis pystyä syöttämään virtaa sopivalla alueella erikokoisille moottoreille. Esimerkkeinä voidaan käyttää isoa moottoria, jonka vaihevastus on 3 milliohmin kokoluokkaa ja pientä moottoria, jonka vaihevastus on noin 3 ohmia. Käytetään esimerkkeinä Cropico DO5000-mittarin käyttämiä mittausvirtoja taulukosta 2. Esimerkin tapauksessa mittausvirrat olisivat siis 10A ja 1A. Mittausjännite voidaan nyt laskea kaavalla

$$U = R \times I = (3*10^{-3}\Omega)(10A) = 30mV \quad (1)$$
$$U = R \times I = (3\Omega)(1A) = 3V,$$

missä U on moottorin navoilta mitattu jännite, I moottoriin syötetty mittausvirta ja R käämin resistanssi. Laitteistossa käytettävän virtalähteen tulee siis pystyä antamaan suuri virta pienellä jännitteellä ja pienempi virta suuremmalla jännitteellä ilman häiriöitä. Riittämätön virtalähde voi aiheuttaa mittausvirtaan epätasaisuuksia, jotka vaikuttavat

mittaukseen kuten kappaleen 2.3 esimerkissä todettu 200 milliohmin mittausalue Cropico DO5000-mittareissa.

Oleellinen haaste tulee olemaan mittauskaapelien kiinnittäminen moottorien navoille. Kytkentäkotelon rakenne vaihtelee suuresti, jolloin mittauskaapelien reitittäminen voi olla haastavaa tietyillä moottorityypeillä. Liitäntänapojen koko vaihtelee riippuen moottorin koosta, jolloin yhdet mittausjohdot eivät välttämättä sovi kaikille moottoreille. Tällöin pitäisi harkita mittauskaapelien vaihtoa testikertojen välillä. Tämä kuitenkin lisää koestajien työtaakkaa, jolloin saatava hyöty työmäärään heikkenee. Keskustelusta koestajien kanssa ilmeni etenkin huoli siitä, että ylimääräiset johdot saattavat olla tiellä, kun testattavia moottoreita irrotetaan ja asennetaan testipenkkiin ja jopa aiheuttaa kompastumisvaaran. Tämä pitää ottaa huomioon järjestelmän suunnittelussa.

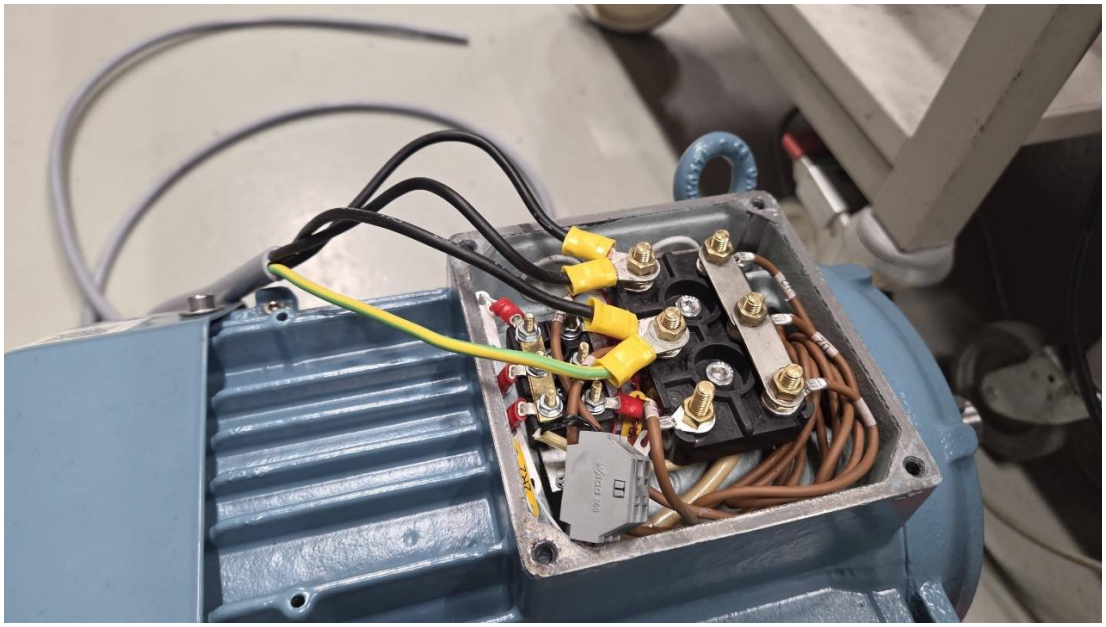
Erityisen tärkeää on varmistaa mittauslaitteiston yhteistyö PLC-automaation kanssa, jonka avulla testiä ohjataan. Automaation täytyy varmistaa, että jännite on kytketty pois ennen mittauksen aloittamista tai mittauslaitteisto voi vaurioitua. Riskinä on myös moottorin pyöriminen jännitteen poiskytkemisen jälkeen. Tällöin moottorissa oleva remanenssijännite vaikuttaa mittaukseen, jolloin tulokset ovat käyttökelvottomia ja pahimmassa tapauksessa mittausvirran syöttöön käytettävä jännitelähteen voi hajota. Automaation on siis kyettävä varmistamaan, että moottori on pysähtynyt ennen kuin mittaus aloitetaan.

4 Mittausjärjestelyn testaaminen

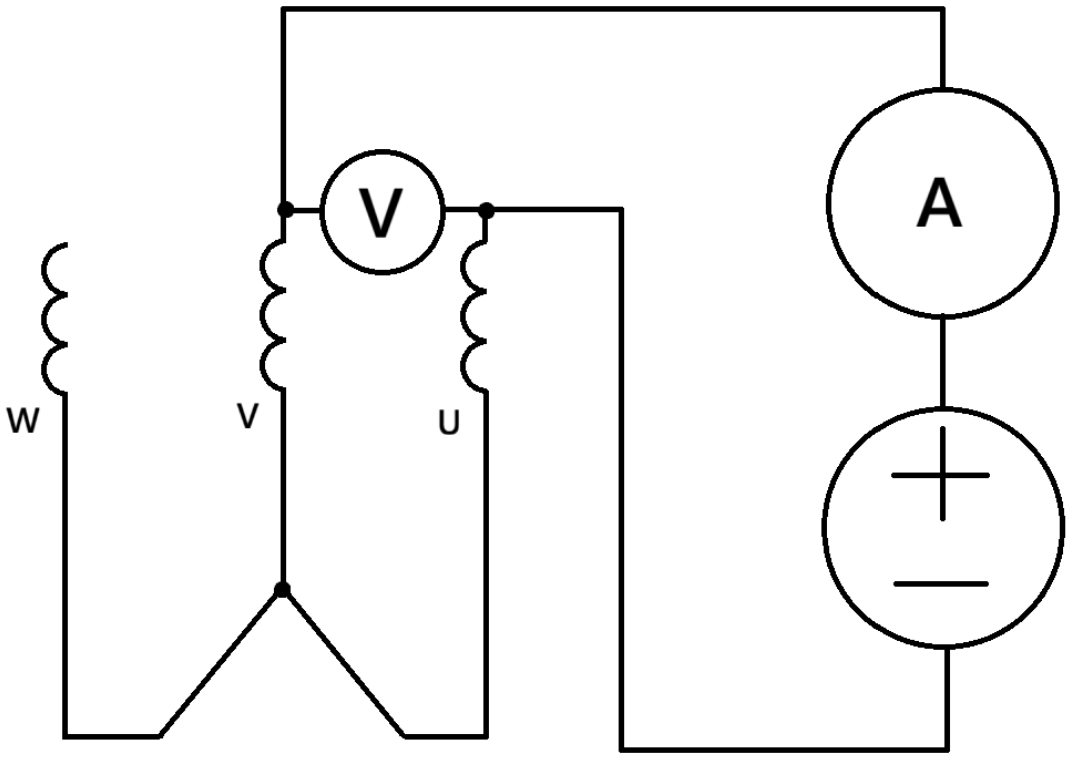
Tässä luvussa keskitytään käytännön mittausjärjestelyn testaamiseen käytettyyn koekytkentään ja sillä suoritettuihin mittauksiin. Esitellään testissä käytetyt laitteet ja kytkentä. Analysoidaan mittaamalla saadut arvot sekä verrataan tuloksia kalibroituun vastusmittariin.

4.1 Testauslaitteisto

Käytännön testaus suoritettiin ABB:n MM-rakennuksen koekentällä. Testattavana moottorina käytettiin M3BL 90LB 4 IMB3/IM1001-mallista synkronireluktanssimoottoria. Testiin valittiin tämä kokoluokaltaan pieni moottori, koska silloin voitiin varmistua, että saatavilla oleva virtalähde riitti tuottamaan tarvittavan mittausvirran. Virtalähteenä testissä käytettiin Bremi BRS 64-professional-tasavirtalähdettä, joka kykeni syöttämään tarvittavan suuren mittausvirran moottorille. Jännitteen ja virran mittaukseen käytettiin Fluke Norma 5000-tehoanalysaattoria. Fluken (n.d.) mukaan Norma 5000-tehoanalysaattorin minimitarkkuus käytetyllä PP50 kanavalla on 0,1 % (0,05 % kiinteä virhe + 0,05 % mitatusta arvosta). Suurimmaksi mahdolliseksi virheeksi vastusmittaukselle saadaan siis 0,2 %. Verrattuna taulukon 2 DO-5000-mittarin tarkkuuteen tämä on hieman epätarkempi, mutta kuitenkin tähän tarkoitukseen sopiva. Mittaustuloksen tarkistamiseen käytettiin DO-5000-mittaria. Norma 5000- ja DO-5000-mittarit olivat hyväksyttyjä ja kalibroituja eli niillä tehdyt mittaukset ovat luotettavia.



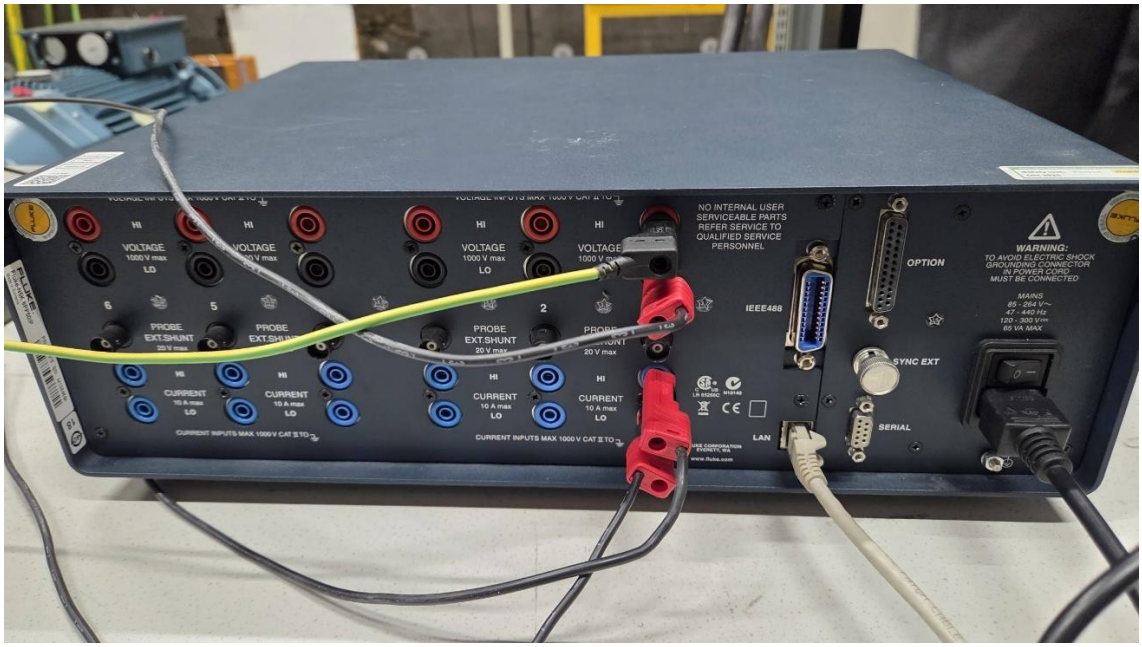
Kuva 2. Mittauskytkentä moottorin navoilla.



Kuva 3. Mittauskytkennän piirikaavio.

Moottorin navat kytkettiin kuvan 3 mukaisesti tähtipistekytkentään eli niin sanottuun Y-kytkentään. Tällöin käämien kakkospuolet ovat kytkettynä yhteen metalliliuskalla kuten nähdään kuvasta 2. Vastuksien arvot lasketaan mitatun jännitteen ja virran perusteella kaavalla

$$R = \frac{U}{I}. \tag{2}$$



Kuva 4. Fluke Norma 5000-mittarin kytkennät.

Kuva 5. Bremi BRS 64-jännitelähde.

U- ja V-käämien alkupäähän kytkettiin ensin virransyöttö kuvan 5 Bremi-jänniteläheteltä, joka kulki kuvan 3 piirikaavion mukaisesti Fluke Norman läpi virtamittausta varten. Virtakaapelien päälle kytkettiin kaapelit jännitteenmittausta varten ja niiden toiset päät kytkettiin kuvan 4 mukaisesti Fluke Norman jännitteenmittauskanaviin. Tärkeää oli kytkeä virransyöttökaapelit jännitteenmittauskaapeleiden alapuolelle. Tällöin virta ei kulje jännitteenmittauskaapeleiden liittimien läpi, joissa ylimääräinen resistanssi voisi vaikuttaa mittaukseen. Tässä mittauksessa virransyöttöä ei tehty oikeiden syöttökaapeleiden läpi, koska se ei ole oleellinen osa tätä testiä eikä vaikuta mittaustulokseen. Lopullisessa järjestelmässä mittausvirran syöttö olisi kiinnitettynä syöttökaapeleiden päähän sähkökaapin sisällä. Lopullisessa, käyttöönotettavassa järjestelyssä jännitelähde pitäisi suojata tyyppitestien aikana syötettävältä jännitteeltä releillä, joissa on riittävä ilmaväli. Fluke Norma oli testissä tarkoitus kiinnittää LAN-portilla tietokoneeseen, jossa mittausohjelma MotLab olisi tallentanut mitatut arvot. Mittauksen aikana kuitenkin ilmeni ongelma Norman yhdistämisessä kannettavaan tietokoneeseen ja mittausohjelman ongelma, jossa tasajännitteen mittausta ei ollut vielä toteutettu MotLab-ohjelmaan. Näiden ongelmien takia arvot kirjattiin ylös suoraan Norman näytöltä. Tämä ei vaikuta merkittävästi mittaustuloksiin eikä sen takia ole oleellinen osa tätä testiä. Viemällä arvot tietokoneelle

olisi kuitenkin voitu saada hieman tarkempia arvoja ja silloin voidaan vähentää häiriöiden vaikutuksia laskemalla virran ja jännitteen keskiarvot muutaman sekunnin ajalta. Mittauksen alussa todettiin, että moottorin pintalämpötila oli 20,3°C ja varmistettiin, että Norma on asetettu mittaamaan tasajännitettä.

4.2 Mittaustulokset

Taulukko 3. Mittausvirran ja -jännitteen mitatut arvot.

Vaiheväli	Mittausvirta I (mA)	Jännite U (V)	Laskettu resistanssi R=U/I (Ω)
U-V	303,07	0,7783	2,5681
U-W	305,91	0,7821	2,5566
V-W	308,22	0,7928	2,5722

Taulukossa 3 on taulukoituna testissä mitatut arvot. Mittausvirta oli noin 300 milliampeeria, mikä on vajaat 10 % moottorin 4,89 ampeerin nimellisvirrasta ja täten hyvin sopiva tähän mittaukseen.

Taulukko 4. Mitattujen vastuksien vertailu laskettuihin vastuksiin.

Vaiheväli	Vaihevastus (Cropico DO5000) (Ω)	Laskettu vastus (Ω)	Ero (%)
U-V	2,5609	2,5681	0,279
U-W	2,5524	2,5566	0,166
V-W	2,5682	2,5722	0,155

Taulukossa 4 on Cropicolla mitatut ja lasketut vastusarvot vierekkäin. Suhteellinen ero on laskettu kaavalla

$$\Delta R\ (\%) = \frac{|R_M - R_L|}{R_M}, \tag{3}$$

missä R_M on mitattu resistanssin arvo ja R_L mitatuista arvoista laskettu resistanssin arvo. Kuten taulukosta 4 nähdään, on tuloksien välinen ero todella pieni. Ero selittyy osittain mittarien mittausepätarkkuuksilla ja osittain pienellä käämityksen lämpötilan muutoksella ensimmäisen mittauskerran jälkeen. Tämä ero on testausprosessin kannalta käytännössä merkityksetön. Tämä laskentavaihe olisi valmiissa järjestelmässä automatisoitu, jolloin MotLab saisi vastuksien arvot suoraan ja laskentaan saataisiin vielä tarkemmat arvot koska Norman näyttö kykenee näyttämään arvot vain 5 merkitsevän luvun tarkkuudella.

5 Pohdinta

Tulosten perusteella selvisi, että nelijohdinmenetelmällä mitattujen arvojen avulla lasketut vastuksien arvot olivat lähellä Cropico-mittarilla mitattuja arvoja. Arvojen suhteellinen ero oli alle 0,28 % ja keskimäärin vain 0,2 %. Tämä ero on lähellä mittarien mittaustarkkuutta. Ero tuloksissa selittyy siis osittain mittaustarkkuudella. Yksi tuloksiin vaikuttava tekijä on moottorin käämin lämpötila, sillä testiä suorittaessa nelijohdinmenetelmällä mittausvirta oli pidempään päällä. Tämä johtui menetelmän kokeilullisesta luonteesta, jossa jouduttiin mittauksien välillä varmistamaan laitteiston toimivuus ja hienosäätämään mittausvirtaa. Tämä näkyi tuloksissa niin, että nelijohdinmenetelmällä mitattu vastusarvo oli kaikissa mittauksissa suurempi kuin vastusmittarilla mitattu arvo. Tämä johtuu siitä, että käämin lämmetessä sen vastusarvo kasvaa.

Mittausjärjestelmän kytkentä toteutettiin mahdollisimman huolellisesti ja todenmukaisesti jotta se vastaisi oikeita koekentän olosuhteita. Arvot kirjattiin suurimmalla mahdollisella tarkkuudella, jotta saatiin mahdollisimman tarkka tulos.

Nelijohtomenetelmän käyttöönoton esteenä ei siis ole mittaustarkkuus vaan käytännön toteutus koekentälle. Tärkeä osa käyttöönottoa on mittausjärjestelmän akkreditointi eli sen toteaminen päteväksi ja luotettavaksi. Fluke Norman osalta tämä ei ole ongelma, mutta koko järjestelmä pitää silti todeta toimivaksi. Järjestelmää toteuttaessa on tärkeää valita jännitelähde niin, että se pystyy syöttämään tarpeeksi mittausvirtaa eri kokoisille moottoreille.

Menetelmän käyttöönottamiseksi koekentälle mittauslaitteisto pitää saada toimimaan osana koekentän automaatiota. Fluke Norman ja MotLab-ohjelmiston välinen tiedonsiirto on tärkeä jäähtymäkäyrän mittauksen ajoittamiseksi. Mitatut arvot pitää saada luotettavasti siirrettyä ja tallennettua heti mittauksen jälkeen. Koestuksessa on aina mahdollista, että mittausohjelmaan tai tietokoneeseen tulee ongelma, jonka takia ohjelma tai koko tietokone saattaa sammua. On varmistettava, että ongelmatilanteissa saadaan palautettua mitatut arvot mittausohjelmaan. Automaation pitää olla lisäksi yhteydessä

jännitelähteeseen, jotta se tietää kuinka suuri mittausvirta tarvitaan sillä hetkellä testattavana olevalle moottorille.

Mittauskaapelien kytkemiseen moottoreille pitää kehittää sopiva ratkaisu, jotta se toimii sujuvasti. Tämä voisi olla esimerkiksi se, että erikokoisien moottoreiden välillä vaihdetaan erikokoiset mittauskaapelit niillä testipaikoilla, joissa testataan monia eri kokoisia moottoreita. Mittauskaapelien kuntoa tarvitsee valvoa. Täytyy varmistaa, että huonoon kuntoon päässyt kaapeli ei altista koestajia sähköiskun riskille tai vaikuta mittaustuloksiin. Järjestelmä täytyy toteuttaa niin, että jännitelähde, joka syöttää mittausvirtaa ei tule kosketuksiin testissä syötettävään jännitteeseen. Suojareleiden ohjaukset pitää siis toteuttaa huolellisesti niin, että ei jää mahdollisuutta niiden sulkemiselle silloin kun jännite on kytkettynä.

6 Johtopäätökset

Työn tavoitteena oli selvittää, voidaanko nykyinen manuaalinen vaihevastusmittaus korvata automatisoidulla volttiampeerimenetelmällä ja saavutetaanko sillä riittävä tarkkuus.

Työn perusteella voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset:

1. Volttiampeerimenetelmän mittaustarkkuus on riittävä. Menetelmän ja referenssimittauksen välinen ero on käytännön tuloksien kannalta merkityksetön, kun käytetään Fluke Norma 5000-tehoanalysaattoria.
2. Menetelmien välinen ero selittyy mittarien epätarkkuuksilla ja käämien lämpenemisellä testin aikana.
3. Automaattinen mittaus parantaa työturvallisuutta, kun moottorin liitäntäkotelon kantta ei tarvitse avata ja jännitteisiin osiin ei tarvitse koskea kesken koestuksen.
4. Siirtyminen automaattiseen mittaukseen on perusteltua ja mahdollista, mutta siihen vaaditaan investointeja.

Menetelmän ottamiseksi käyttöön koekentällä tarvitaan ainakin seuraavia toimenpiteitä:

- Mittauslaitteisto pitää integroida osaksi MotLab-ohjelmistoa ja LPC-automaatiota, jotta mittausdatan tallennus ja mittauksen suorittaminen toimivat sujuvasti.
- Mittausvirtaa syöttävä jännitelähde on suojattava etäohjattavilla releillä, jotta se suojataan jännitteeltä ja mittaus saadaan ohjattua oikealle vaiheväliile.
- Mittauskaapelien kytkeminen erikokoisille moottoreille on ratkaistava niillä koestuspaikoilla, joissa se on tarpeellista.
- Mittausjärjestelmä tulee akkreditoida kokonaisuudessaan ennen käyttöönottoa.

Jatkotutkimusta tarvitaan ainakin mahdollisiin ympäristön vaikutuksiin mittaustuloksiin. Koekentällä on vierekkäin monia testipenkkejä ja läheinen, käytössä oleva testipenkki voi mahdollisesti aiheuttaa häiriöitä mittaukseen. Toinen jatkotutkimuksen kohde on

ulkoisien shunttien käyttäminen. Niitä käyttäessä täytyy niiden mittausepätarkkuus lisätä Norman sisäiseen epätarkkuuteen. Tällöin epätarkkuus voi kasvaa yli 0,2 prosenttiin.

7 Yhteenveto

Tämän kandidaatintutkielman tavoitteena oli selvittää mahdollisuutta korvata nykyinen manuaalinen vaihevastusmittaus automatisoidulla volttiampeerimenetelmällä ABB IEC LV Motorsin koekentällä. Automatisoidun vastusmittauksen perusteena on tehostunut koestusprosessi, parantunut laatu ja työturvallisuuden parantaminen.

Päämääränä oli selvittää menetelmän soveltuvuutta juuri koekentälle eikä tehtaan muihin testitarpeisiin. Mittaustapaa voidaan käyttää kaikille koekentällä testattaville kolmivaihemoottoreille, mutta mittauksissa keskityttiin yhteen pienempään moottoriin.

Toteutettiin testilaitteisto, jossa Fluke Norma 5000-tehoanalysaattorilla mitattiin virtaa ja jännitettä. Mittausvirta syötettiin erillisellä Bremi BRS 64-tasajännitelähteellä. Vaihevastusmittaukset suoritettiin M3BL 90LB 4-malliselle synkronireluktanssimoottorille. Saatuja mittaustuloksia verrattiin koekentällä käytössä olevaan kalibroituun DO5000-mikro-ohmimittariin.

Mittaustuloksien perusteella volttiampeerimenetelmällä saavutettiin riittävä tarkkuus. Testissä uuden menetelmän ja referenssitulosten välinen ero oli alle 0,3 %, joka on käytännön sovelluksien kannalta pieni. Ero selittyy mittauslaitteiden tarkkuuksilla ja testin aikana tapahtuneena käämien lämpenemisenä. Vielä tarkempia arvoja olisi voitu saada tuomalla arvot tietokoneelle. Tulosten perusteella Fluke Norma 5000 soveltuu vastusmittauksien suorittamiseen.

Tulosten perusteella siirtyminen automaattiseen mittaukseen on ABB:n näkökulmasta perusteltua ja teknisesti mahdollista, mutta käyttöönotto vaatii paljon toimenpiteitä. Keskeisimmät haasteet ovat mittauslaitteiston integroiminen osaksi MotLab-ohjelmistoa ja ohjausautomaatiota sekä käytännön ratkaisujen tekeminen eri kokoisten moottorien mittauskaapelien suhteen.

Lähteet

Eaton. (n.d.). *Motor insulation class and expected life.* Noudettu 16.12.2025 osoitteesta https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/electrical-circuit-protection/fuses/solution-center/bus-ele-tech-lib-motor-insulation-class-life.pdf

Fluke. (n.d.). *Fluke Norma 5000 Six-Phase Power Analyzer Data Sheet.* Noudettu 16.12.2025 osoitteesta https://www.fluke.com/fi-fi/product/electrical-testing/power-quality/norma-5000/ds

International Electrotechnical Commission. *(2017). Rotating electrical machines.* (IEC 60034-1).

International Electrotechnical Commission. *(2014). Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)* (IEC 60034-2-1:2014).

Institute of Electrical and Electronics Engineers. (2017). *IEEE standard test procedure for polyphase induction motors and generators* (IEEE Std 112-2017).

Seaward. (n.d.). *Cropico DO5000 / DO5001 / DO5002 Digital Microhmmeter technical manual.* Noudettu 16.12.2025 osoitteesta https://www.seaward.com/gb/support/download/343/