SAVONIA
ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ITKONNIEMEN VESILAITOKSEN LAAKERIVIRTASELVITYS

TEKIJÄ Jesse Pursiainen

SAVONIA-AMMATTIKORKEAKOULU

OPINNÄYTETYÖ
Tiivistelmä

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Jesse Pursiainen	
Työn nimi Itkonniemen vesilaitoksen laakerivirtaselvitys	
Päiväys 29.5.2023	Sivumäärä/Liitteet 31
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Kuopion Vesi Oy, ABB	

Tiivistelmä

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tehdä laakerivirtaselvitys Kuopion Vesi Oy:lle. Laakerivirtaselvityksen kohteena oli Itkonniemellä sijaitseva verkostovesipumppu, missä epäiltiin esiintyvän laakerivirtoja. Laakerivirtaselvitys tehtiin yhteistyössä ABB Jarkko Monthan kanssa. Laakerivirtaselvitys tehtiin mittaamalla laakerivirtoja kaksi kertaa. Mittauksien välissä tehtiin lisämaadoitus, minkä vaikutusta tutkittiin toisella mittauskerralla.

Laakerivirtaselvitys tehtiin verkostovesipumpulle, koska epäiltiin esiintyvän laakerivirtoja laakerin nopean huonontumisen takia. Laakerin huonontumista epäiltiin siitä aiheutuvasta äänihaitasta, mikä oli lisääntynyt suuresti lyhyen ajan sisällä. Lisämaadoituksen tarkoituksena oli vähentää laakerivirtojen aiheuttamia haittoja laakereille. Laakerivirtaselvityksessä tehdyt mittaukset suoritettiin käyttäen Rohde & Schwarz RTH1004 oskilloskooppia, PEM CMC06 Rogowskin keloja ja maadoitusharjaa. Oskilloskoopilla mitattiin summa- ja akselivirtaa, kiertovirtaa ja akselijännitettä ennen lisämaadoitusta ja lisämaadoituksen kanssa.

Mittauksien jälkeen työssä tutkittiin mitattuja arvoja laakerivirtojen esiintymisen toteamiseksi sekä mahdollisia esiintyviä haittoja. Mitatut arvot ovat alustavia tuloksia, joille tulisi tehdä suodatuksia tarkan tuloksen saamiseksi. Alustavien tuloksien avulla saatiin suuntaa antavaa tietoa siitä, mitä kohteessa esiintyy ja onko laakerivirtaesiintymät haitallisia laakereille. Alustavia tuloksia käytettiin kiireellisen aikataulun vuoksi.

Avainsanat

Lisämaadoitus, oskilloskooppi, rogowsking kela, maadoitusharja, summavirta, akselivirta, kiertovirta ja akselijännite.

SAVONIA UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

THESIS
Abstract

Field of Study Technology, Communication and Transport	
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering	
Author Jesse Pursiainen	
Title of Thesis Bearing Current Clarification	
Date 29 May 2023	Pages/Appendices 31
Client Organisation /Partner Kuopion Vesi Oy, ABB	

Abstract

The purpose of this thesis was to do bearing current measurements for Kuopion Vesi. The target was in Itkonniemi, where it was suspected to occur bearing currents. These measurements were done in cooperation with Jarkko Monthan from ABB.

Bearing current measurements were done twice since the idea was to put additional grounding after the first measurement. The purpose of the additional grounding was to see the effect on bearing currents. Bearing current measurements were done for the water pump system because of the doubt of occurring bearing currents. These doubts arose because of a fast fall in quality in the bearing. The reason of the doubt was the additional voice which was growing within a short period. The purpose of the additional grounding was to decrease the harm caused by bearing currents. Bearing current measurements were done by using the Rohde & Schwarz RTH1004 oscilloscope, PEM CMC06 Rogowski current transducers and shaft grounding brush. The idea of using oscilloscope was to measure the sum flow, shaft current, circulating current and shaft voltage before and after the additional grounding.

As a result of this thesis, it was possible to see if there are any bearing currents and how they affect the bearing. The measurements that were done in this thesis are preliminary. To get more accurate results, the measured values should be filtered to get a more accurate outcome. Filtering was not done because of the lack of time. Preliminary results give directional information about disadvantages which may occur in bearings by bearing currents.

Keywords

Additional grounding, oscilloscope, Rogowski current transducer, shaft grounding brush, sum flow, shaft current, circulating current and shaft voltage.

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO 6
2 KUOPION VESI OY 7
3 LAAKERIVIRTA 8
3.1 Laakerivirrat taajuusmuuttajakäyttöisissä oikosulkumoottoreissa 8
3.2 Laakerivirrat oikosulkumoottorissa 9
3.2.1 Kiertovirrat 9
3.2.2 Maadoitusvirrat 10
3.2.3 Kapasitiiviset virrat 10
3.3 Laakerivirtojen haitat 11
4 LAAKERIVIRTOJEN HALLITSEMINEN 13
4.1.1 Taajuusmuuttajakäyttöisten moottorien kytkentöjen tekeminen 13
4.2 Kaapelirakenteen vaikutus 13
4.2.1 Symmetrinen kaapelointi ja PE 13
4.2.2 Kaapelin EMC-suojaus 14
4.2.3 Kaapelin pituuden huomioiminen taajuusmuuttajakäyttöisissä moottoreissa 14
4.2.4 EMC-häiriöt ja niiden poistaminen 14
4.3 Siniaaltosuodatin 15
4.4 Eristetyt laakerit/laakeri pesät 16
4.5 Ferriittirenkaat 17
5 MITTAUKSET 19
5.1 Mittalaite ja mittapäät 19
5.2 Mittauksen turvallisuus 21
5.3 Mittauskytkennät 22
5.3.1 Summa ja akselivirran mittaus 22
5.3.2 Kiertovirran mittaus 23
5.3.3 Akselijännitteen mittaus 23
5.3.4 Akselijännite ja virran mittaus yhdessä 24
6 MITTAUSTULOKSET 25
6.1 Mittaustulokset ennen ja jälkeen korjausmuutosten 25
6.1.1 Summa ja akselivirta 25
6.1.2 Akselijännite 26

6.1.3 Kiertovirta ... 26

7 YHTEENVETO ... 28

LÄHTEET ... 29

KUVALUETTELO

Kuva 1 Hila-bipolaaritransistori (IGBT). (Aspencore) ... 8

Kuva 2 Pulssileveysmoduloinnin tehonlähteen muodostamat vaihejännitteet. (ABB) ... 9

Kuva 3 Kolme virran käyrää, jotka ovat muodostuneet puolijohdekytkimistä. (Network harmonics, 2020) ... 9

Kuva 4 Havainnollistava kuva oikosulkumoottorin kiertovirroista. (Stone, 2020) ... 10

Kuva 5 maadoitusvirran toiminta. (Heco, 2016) ... 10

Kuva 6 kapasitiivisen virran esiintyminen moottorissa. (Sandwell, 2002) ... 11

Kuva 7 laakerivirran aiheuttama aaltomainen vaurio laakerille. (Taaning-Grundholm , 2016) ... 12

Kuva 8 symmetrisestä kaapelista. (ABB) ... 13

Kuva 9 RFI suodatin. (EMI/RFI suotimet) ... 15

Kuva 10 siniaaltosuodattimesta. (Trafomic) ... 16

Kuva 11 sähköeristetystä laakerista. (Onninen) ... 16

Kuva 12 Suurtaajuisien signaalien vaimentamiseen käytettävä ferriittirengas. (Altium, 2023) ... 17

Kuva 13 Mittauksissa käytetty Rohde & Schwarz RTH1004 oskilloskooppi ... 20

Kuva 14 PEM CMC06, Rogowskin kela. ... 21

Kuva 15 Maadoitusharja. ... 21

Kuva 16 Summa ja akselivirran mittauskytkentä ... 22

Kuva 17 Kiertovirran mittauskytkentä ... 23

Kuva 18 Akselin jännitteen mittauskytkentä ... 23

Kuva 19 Akselijännitteen ja virran yhtäaikaisen mittauksen kytkentä ... 24

Kuva 20 Akselijännitteen ja virran käyrät lisämaadoituksen kanssa. (Monthan, 2023) ... 24

1 JOHDANTO

Työn tarkoituksena on tehdä laakerivirtaselvitys Kuopion Vesi Oy:lle. Laakerivirtaselvityksen kohteena toimii Itkonniemen vesilaitos, jossa selvitys tehdään PU-801 verkostovesipumpulle. Selvityksen kohde sisältää taajuusmuuttajan sekä 250 kW moottorin. Selvitys tehdään mittaamalla moottorista mahdollisia laakerivirta esiintymiä käyttämällä oskilloskooppia sekä laakerivirran mittaukseen tarvittavia mittapäitä.

Työtä varten perehdytään laakerivirtoihin, laakerivirtojen hallitsemisen ja mittauksen teoriaan. Tämän avulla saadaan tietoa mistä laakerivirrat johtuvat, mitä muutoksia kohteeseen tehdään estääkseen laakerivirtojen aiheuttamia haittoja sekä kuinka tuloksia tulee tutkia.

Työssä tehdään laakerivirtamittaukset kaksi kertaa. Ensimmäisellä mittauskerralla mitataan kohteesta summavirta, akselivirta, kiertovirta ja akselijännite. Ensimmäisen mittauksen jälkeen kohteelle tehdään korjauskytkentä, jonka jälkeen mittaus tehdään uudestaan.

Mittauksien jälkeen tutkitaan mittaustulokset. Tuloksien avulla voidaan päätellä, esiintyykö kohteessa laakerivirtoja sekä nähdään, auttaako korjauksien tekeminen hallitsemaan mahdollisia laakerivirta esiintymiä vai pahentaako se asiaa.

2 KUOPION VESI OY

Kuopion Vesi Oy on kaupungin omistama liikelaitos, mikä vastaa Kuopion vesilaitostoiminnasta. Vesilaitostoiminta kattaa vedentuotannon ja vedenjakelun. Näiden lisäksi jätevesien viemäröinti ja puhdistaminen sekä sadevesien viemäröinti. Yrityksessä työskentelee noin 80 työntekijää. (Rautaharju & Tähti, 2013)

Kuopion Veden toiminta alueisiin kuuluu keskeinen kaupunkialue sekä Melalahti, Vehmersalmi, Kurkimäki, Karttula, Nilsiä, Maaninka, Juankoski ja Siilinjärvi. (Kuopion Vesi Oy, ei pvm)

Yrityksellä on 10 vedentuotantolaitosta, 6 jätevedenpuhdistamoa sekä 1500 km vesihuoltoverkostoa. Verkostoon pumpataan n. 17 000 m^3 talousvettä päivittäin ja käsitellään noin 22 000 m^3 jätevettä päivittäin. (Rautaharju & Tähti, 2013)

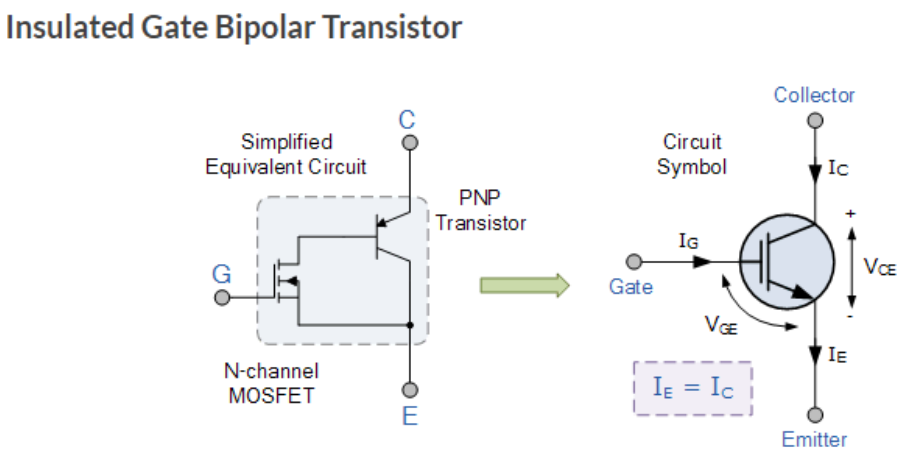
3 LAAKERIVIRTA

3.1 Laakerivirrat taajuusmuuttajakäyttöisissä oikosulkumoottoreissa

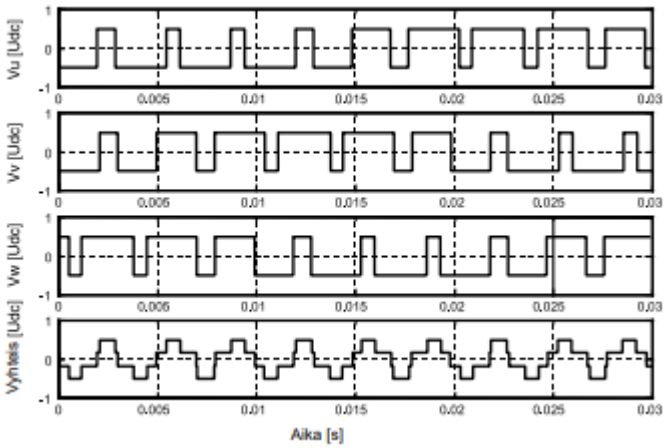
Laakerivirtoja havaitaan taajuusmuuttajakäyttöisissä oikosulkumoottoreissa. Taajuusmuuttajien toimintaperiaate perustuu pulssileveysmodulaatioon kuva 2. Taajuusmuuttajan lähtöjännite muodostuu suurtaajuisista pulsseista, jotka voivat aiheuttaa moottoriin laakerivirtoja. Oikosulkumoottorien laakereiden läpi kulkevat korkeataajuiset virrat aiheuttavat yleensä vahinkoa laakereille. (Collins, 2020)

Taajuusmuuttajakäyttöjen lisääntyminen on lisännyt sähköisiä ongelmia laakereiden kiertovirtana tai vuotoina akselin kautta käytettävään laitteeseen. Nykyään myös mitataan ja tutkitaan enemmän laakerivirtoja. Eli laakerivirtojen haittavaikutukset ovat vähentyneet, sillä taajuusmuuttajien määrä on lisääntynyt ja niiden ehkäisimeksi laitevalmistajat ovat antaneet asennusohjeet taajuusmuuttajakäytöille. (Raatikainen;Heikkinen;& Turunen, 2023)

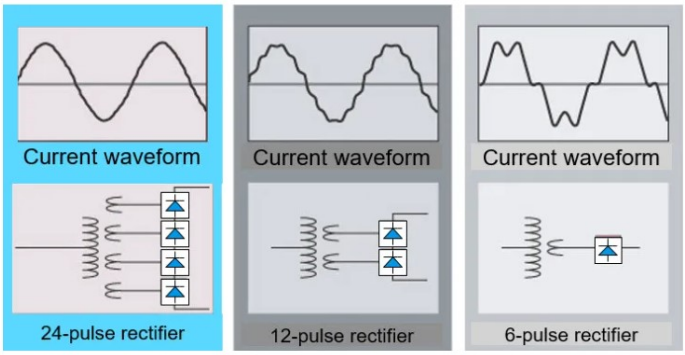
Taajuusmuuttajan pulssinleveysmodulaation toteuttamiseen tarvitaan nopeita puolijohdekytkimiä, joista yleisin on kuva 1 IGBT transistori. Nämä transistorit kytkeytyvät päälle sekä pois päältä taajuusmuuttajassa nopeaan tahtiin, mikä tuottaa sinimuotoisia vaihtovirran aaltoja kuva 3. Taajuusmuuttajalta oikosulkumoottorille syötetty teho ei ole symmetrinen sillä teho liikkuu pulssimuodossa. Tässä tapauksessa oikosulkumoottorille syötetyn tehon kolmen vaiheen summa ei pysty olemaan yhtä suuri kuin nolla. Tämän seurauksena jännite on epätasapainossa. Yksi yleisimpiä syitä laakerivirtojen esiintymiseen on jännitteen epätasapainoisuus. (Collins, 2020)



Kuva 1 Hila-bipolaaritransistori (IGBT). (Aspencore)



Kuva 2 Pulssileveysmoduloinnin tehonlähteen muodostamat vaihejännitteet. (ABB)

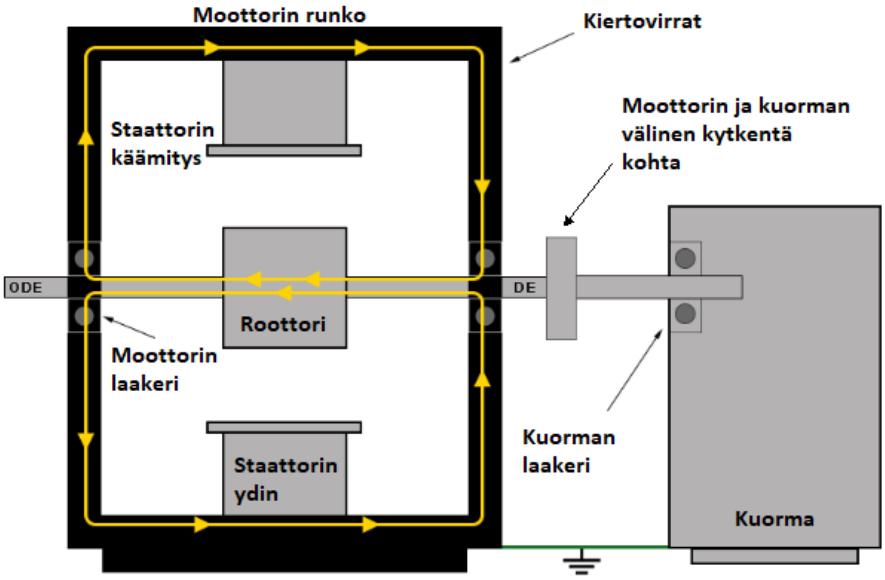


Kuva 3 Kolme virran käyrää, jotka ovat muodostuneet puolijohdekytkimistä. (Network harmonics, 2020)

3.2 Laakerivirrat oikosulkumoottorissa

3.2.1 Kiertovirrat

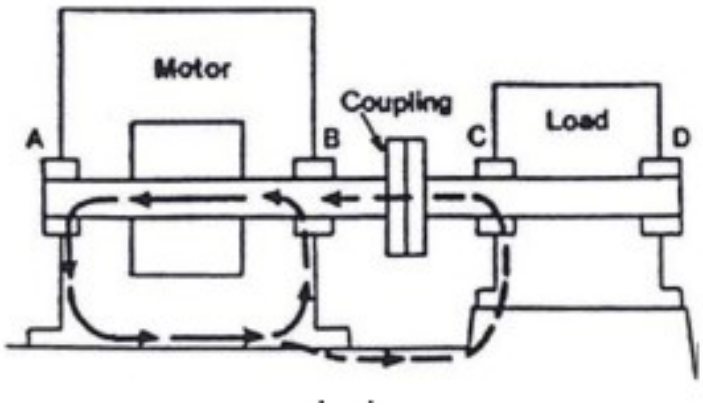
Oikosulkumoottoreissa, joiden akselikorkeus on yli 280 mm voi esiintyä Kuva 4 mukaisia laakerivirtoja. Kiertovirran muodostumiseen tarvitaan korkeataajuinen jännite. Korkeataajuinen jännite muodostuu moottorin akselin päiden väliin roottoria kiertävästä suurtaajuisesta virrasta. Kiertovirta virtaa rungon, laakerien sekä staattorin rungon muodostamaa kehää silloin, kun jännite on tarpeeksi suuri läpäistäkseen laakerin öljykalvon. (Westerlund & Fyhr, ei pvm)



Kuva 4 Havainnollistava kuva oikosulkumoottorin kiertovirroista. (Stone, 2020)

3.2.2 Maadoitusvirrat

Moottorin akselin maadoitusvirrat kuva 5 voivat aiheuttaa laakerivirtoja. Maadoitusvirtojen lähteenä toimivat invertterit. Moottorin akselin maadoitusvirrat vuotavat staattorin rungon kautta takaisin invertteriin. Jokainen reitti, mitä kautta maadoitusvirrat kulkevat takaisin invertteriin, sisältävät impedanssin. Tämä impedanssi aiheuttaa moottorin rungon jännitteen nousun verrattuna lähteen maatasoon. Moottorin akselin ollessa maadoitettu käytettävän koneiston kautta, moottorin rungon jännitteen nousu näkyy laakereissa. Jännitteen ollessa tarpeeksi suuri, jännite läpäisee moottorin ajopään laakerin öljykalvon. Maadoitusvirta kulkee ajopään laakerin, rungon sekä käytettävän koneen kautta takaisin invertteriin. (Westerlund & Fyhr, ei pvm)



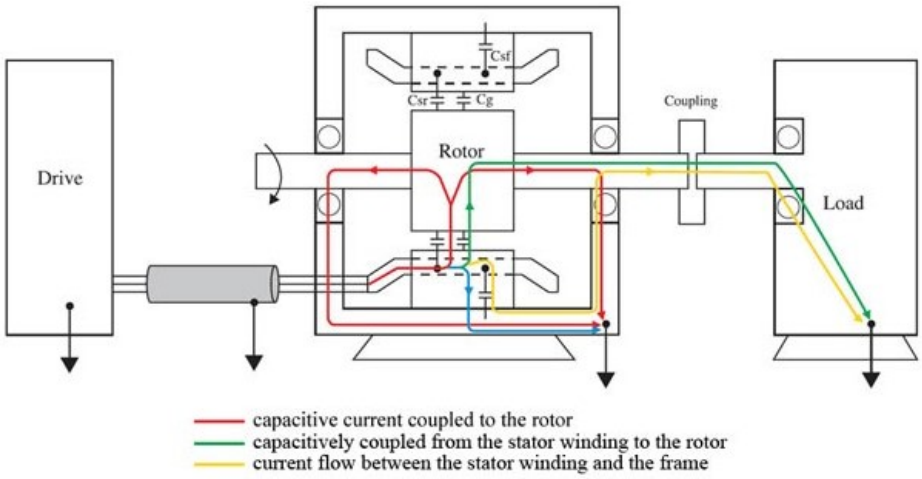
Kuva 5 maadoitusvirran toiminta. (Heco, 2016)

3.2.3 Kapasitiiviset virrat

Kapasitiivista virtaa kuva 6 muodostuu pienempiin moottoreihin, joiden akselikorkeus on alle 280 mm. Kyseisissä kokoluokissa tarpeeksi korkeat akselin jännitteet muodostavat korkea taajuisia laakerivirtapulsseja. Akselin jännitteet muodostuvat, kun yhteismuotoisen jännitteen sisäinen jännit-

teenjako ylittää moottorin sisäiset hajakapasitanssit (Westerlund & Fyhr, ei pvm). Kapasitiivisilta virroilta suojautuminen onnistuu käytettävän laitteen akselin maadoituksella, moottorin rungon maadoituksen lisäksi. (ABB)

Kolmivaiheinen sinimuotoinen teholähde on normaalissa olosuhteessa symmetrinen, eli kolmen vaiheen summa on nolla. Tässä tilanteessa neutraalijännite on yleensä nolla. Pulssileveysmoduloidussa teholähteessä tilanne on erilainen, koska kolmivaiheinen jännite tuotetaan tasajännitteestä. Kyseisessä tilanteessa on mahdotonta muodostaa kolmen lähtöjännitteen summasta nolla, sillä lähtöjännitteitä on käytettävissä kaksi. Tässä tilanteessa neutraalijännite ei ole nolla. Tämän seurauksena muodostuu yhteismuotoinen jännite. (ABB)

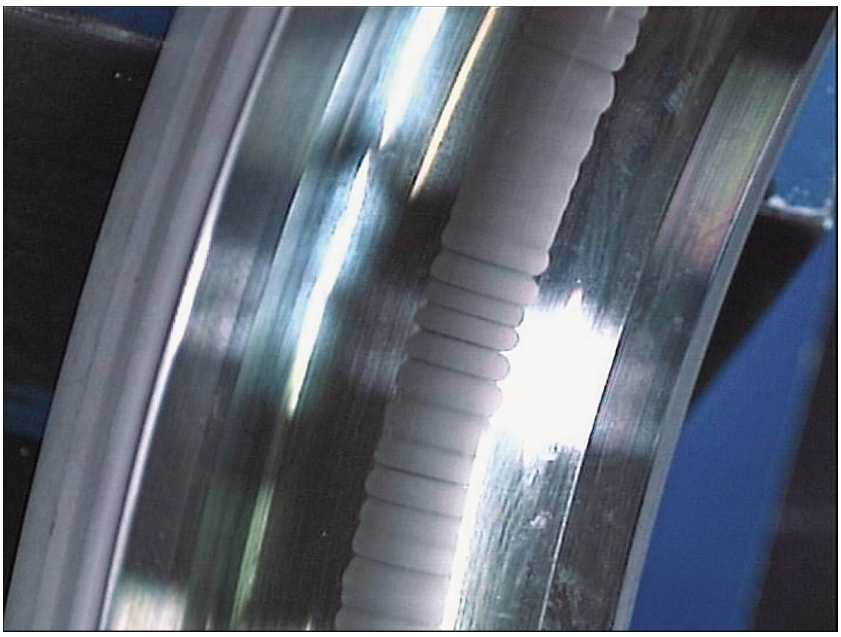


Kuva 6 kapasitiivisen virran esiintyminen moottorissa. (Sandwell, 2002)

3.3 Laakerivirtojen haitat

Laakerivirrat sekä niiden ongelmat ovat yleistyneet moottorien keskuudessa. Syy laakerivirtojen yleistymiseen on pulssinleveysmoduloidut taajuusmuuttajat. Laakerivirtoja esiintyy moottoreissa yleensä silloin, kun moottori on kytketty taajuusmuuttajaan. Laakerivirrat aiheuttavat vahinkoja laakereille sähköpurkauskoneistuksen (EDM) avulla, mistä seuraa moottorivika. (Aegis, 2018)

Akselijännitteet aiheuttavat laakereille sähköisiä vaurioita purkautuessaan sähkökaaren muodossa laakereiden läpi. Vauriot esiintyvät fyysisinä jälkinä laakereiden pinnassa. Akselijännitteet voivat vahingoittaa laakerinpintoja syövyttämällä sitä ja muodostamalla aaltomaisia kuva 7 sekä huurremaisia jälkiä laakerinpintaan. Kyseiset vauriot aiheuttavat ennenaikaisia rikkoutumisia laakereille, josta seuraa moottorin rikkoutuminen. (Aegis, 2018)



Kuva 7 laakerivirran aiheuttama aaltomainen vaurio laakerille. (Taaning-Grundholm , 2016)

4 LAAKERIVIRTOJEN HALLITSEMINEN

4.1.1 Taajuusmuuttajakäyttöisten moottorien kytkentöjen tekeminen

Taajuusmuuttajan ja moottorin asennukset tehdään laitevalmistajien ohjeiden mukaisesti. Asennuksiin kuuluu symmetrinen kaapelointi sekä maadoitukset. Asennuksissa käytetään EMC suojattuja kaapeleita, EMC turvakytkimiä ja EMC asennusholkkeja moottoreissa.

Kaapelimitoitukset perustuvat oikosulku/ylivirtasuojauksiin sekä laitevalmistajien määrittelemiin maksimipituuksiin taajuusmuuttajakäytöissä. Taajuusmuuttajakäyttöihin voidaan lisätä myös erilaisia suodattimia, kuten esimerkiksi sinisuodatin, Du/Dt suodin sekä common mode suodin. Näiden avulla pystytään hallitsemaan laakerivirtoja paremmin. (Raatikainen;Heikkinen;& Turunen, 2023)

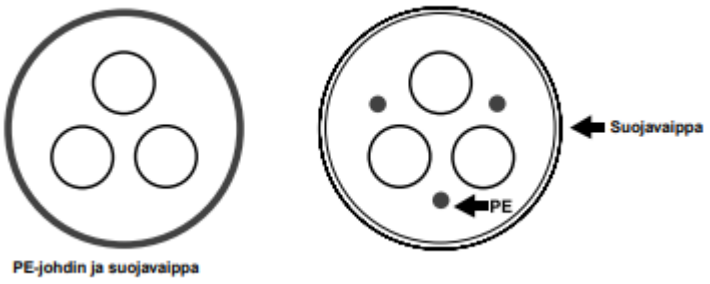
4.2 Kaapelirakenteen vaikutus

Moottorikaapelin maadoitusjohtimen oikeanlaisella rakenteella estetään laakerivirtojen indusointi. Maadoitusjohtimen symmetrisyys toteutetaan kaikkia vaihejohtimia tai kaapelia ympäröivällä johtimella. Moottorikaapeli kaapeli sisältää kolme vaihe- ja maadoitusjohdinta. Näiden johtimien tulisi olla rakenteeltaan symmetrisiä. (ABB) Maadoituksessa tulee ottaa huomioon se, että moottorin maadoitus tulisi olla parempi kuin kuorman maadoitus. Minimitilanteessa maadoituksien tulisi olla yhtä hyvät. (Pesonen, 2023)

4.2.1 Symmetrinen kaapelointi ja PE

Kaapeleiden symmetrisyyden kuva 8 avulla estetään korkeataajuisia jännitteiden indusoitumisia muista johtimista PE-johtimeen. Jos kaapelit olisivat epäsymmetriset, aiheutuisi siitä rungon potentiaalin vaihteluita, sillä PE-johdin on kiinni sähkökoneen rungossa. Nämä kyseiset potentiaalin vaihtelut voivat aiheuttaa laakerivirtoja (Kanninen, 2011). Kaapelin epäsymmetrisyys syöttää käyttöjärjestelmään nettomaavirtaa sekä lisää maadoitusvirran aiheuttamia ongelmia. (Shah, 2011)

Sähköisesti symmetrinen kaapeli muodostuu, kun tehollinen etäisyys kaikista vaiheista maahan on sama. Jos maadoitukset on sijoitettu kaikkiin väleihin kaapelissa, se parantaa kaapelin vaiheimpedanssia. (Shah, 2011)



Kuva 8 symmetrisestä kaapelista. (ABB)

4.2.2 Kaapelin EMC-suojaus

Kaapelille tulee toteuttaa lyhyt, pieni-impedanssinen paluureitti yhteismuotoiselle virralle takaisin taajuusmuuttajaan. Paras ja helpoin vaihtoehto on käyttää suojattua moottorikaapelia. Suojaukset toteutetaan suojavaipalla, minkä materiaali tulisi olla kuparia tai alumiinia. Liitosten tulisi olla 360-liitoksia. Nämä liitokset tehdään EMC-sukalla ja kaapelinsuojavaipalla. (ABB)

4.2.3 Kaapelin pituuden huomioiminen taajuusmuuttajakäyttöisissä moottoreissa

Moottorin ja taajuusmuuttajan välisen kaapeloinnin asennuksessa on tärkeä ottaa huomioon kaapelin pituus sekä asennus. Taajuusmuuttajan kaapeli olisi tärkeä pitää mahdollisimman lyhyenä. Suositeltu kaapelin pituus olisi maksimissaan 30 metriä. Suositeltuun kaapelin pituuteen tulee ottaa huomioon myös moottorin ja taajuusmuuttajan mallien väliset erot. (Vfds.org, ei pvm)

Taajuusmuuttajan koko vaikuttaa kaapeloinnin pituuteen. Mitä suurempi on taajuusmuuttaja, sitä pidempi kaapeli voi olla vaikuttamatta kytkentään negatiivisesti. Taajuusmuuttajat, joiden teholuokka on yli 15 kW voi kaapelin pituus olla noin 300 metriä. Pienemmillä taajuusmuuttajilla, joiden teholuokka on 15 kW tai alle voi kaapelin pituus olla noin 100 metriä. Näitä suositeltavia rajoja noudatetaan maavirtojen yhteydessä, jos taajuusmuuttaja ei toimi kunnolla. (Vfds.org, ei pvm)

Suuremmissa taajuusmuuttajakäytöissä, missä kaapelin pituus on 300 metrin luokkaa, tulisi kaapeloinnissa käyttää sinisuodattamia. Sinisuodatin mahdollistaa lähes sinimuotoisen jännitelähdön. Tämän avulla voidaan vähentää moottorissa ilmenneitä laakerivirtoja. (Vfds.org, ei pvm)

Taajuusmuuttajalta moottorille menevä syöttävä kaapeli sisältää kapasitanssia. Pääongelmista tässä yhteydessä on jännitteenheijastus. Kaapelin etäisyyden ollessa liian pitkä, virtakaapeleiden ja moottorin impedanssi ei ole tasainen. Jännitteenheijastumisen mahdollisuus on suuri, normaalin pulssileveysmodulaation signaalin ja impedanssin törmätessä keskenään. (Nagda, ei pvm)

Kapasitanssi ja jännitteen heijastukset, jotka johtuvat väärästä impedanssista, voivat aiheuttaa heijastuneen aallon lisäämisen taajuusmuuttajasta tulevaan perusaaltomuotoon. Tämä johtaa merkittävästi korkeampaan jännitteeseen moottorin liittimissä. (Nagda, ei pvm)

4.2.4 EMC-häiriöt ja niiden poistaminen

EMC-häiriöt ilmenevät sähkölaitteessa- tai laitteistossa sähkömagneettisena ilmiönä. Nämä sähkömagneettiset ilmiöt eivät ole tarkoitettu hyötykäyttöön. EMC-häiriöt laitteessa sekä laitteistossa tulevat toisilta laitteilta johtimia pitkin tai säteilynä. (tukes, ei pvm)

Radiotaajuisten häiriöiden (RFI) suotimilla kuva 9 vaimennetaan johtuvia häiriöitä sellaisissa verkkoliitäntäkohdissa, jossa suodin johtaa häiriöt maahan. Suotimien käyttöä suositellaan teollisuudessa, jos lähistöllä EMC-ongelmien riski on suuri. Suotimia on kannattavaa käyttää, vaikka tuotestandardissa ei aseteta nykyään rajoja johtuville häiriöille. (ABB) RFI-suotimet asennetaan siten, että se vaimentaa taajuusmuuttajasta sähköverkkoon tulevia häiriöitä. (SähköNet, ei pvm)

Kuva 9 RFI suodatin. (EMI/RFI suotimet)

Sähkömagneettisessa ympäristössä havaitaan sähkömagneettisia häiriöitä, johon laite vaikuttaa. Sähkömagneettiset ympäristöt muodostuvat sähkömagneettisista tapahtumista. Sähkömagneettisen ympäristön tärkeimmät vaikutukset ovat EMI ja EMC. Sähkömagneettisen ympäristön muodostumisen kannalta kaksi tärkeää asiaa ovat taajuus ja amplitudi. (Eurolab, ei pvm)

Sähkömagneettisia häiriöitä voidaan poistaa monella eri tapaa. EMI:tä varten on maadoitus. Sen tarkoituksena on vähentää radiotaajuisten jännitteiden esiintymistä. Kyseiset radiotaajuiset jännitteet aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä. Muita tapoja sähkömagneettisten häiriöiden poistoon on suojaus, sitomismenetelmä, suodatus sekä johdotus. (Eurolab, ei pvm)

Taajuusmuuttajakäyttöisissä moottoreissa voidaan suojata emc häiriöiltä tekemällä asianmukainen emc suojaus. Suojausmenetelmiin kuuluu 360 liitäntä emc vaipalle maadoituksessa, moottorin kytkentäkoteloon emc holkit sekä kaapelille emc panta. (Pesonen, 2023)

4.3 Siniaaltosuodatin

Siniaaltosuodattimet kuva 10 ovat alipäästösuodattimia, jotka muuntavat moottorikäyttöjen PWM-lähtösignaalin tasaiseksi siniaaltojännitteeksi alhaisella jäännösaaltoilulla (Schaffner, ei pvm). Eli siniaaltosuodattimella pyritään muuttamaan taajuusmuuttajan jännitepulssit perustaajuiseksi siniaalloksi (Kainulainen, 2012). Siniaaltosuodattimet tunnetaan myös nimellä LC-suodattimet. Kyseisiä suodattimia käytetään yleensä yhdessä taajuusmuuttajien kanssa. Suodattimet suojaavat moottoreita liialliselta jännitepiikiltä ja ylikuumenemiselta. (Schaffner, ei pvm) LC-suodattimilla suodatetaan pois kaikki taajuudet, mitkä ovat perustaajuuden yläpuolella. (Hämäläinen, 2010)

Kuva 10 siniaaltosuodattimesta. (Trafomic)

Yleisiä sovelluksia ovat moottorikäytöt pitkällä moottorikaapelilla, moottorikäytöt, joissa on useita moottoreita rinnakkain ja niillä on jälkiasennukset. (EMIS, ei pvm)

4.4 Eristetyt laakerit/laakeri pesät

Laakeri, joka on eristetty laakeri ja jolla on kyky estää virran kulkemista laakerista läpi, kutsutaan yleisesti sähköeristetyksi laakeriksi kuva 11. Laakerin eristyskyky perustuu alumiinioksidi kerrokseen laakerin ulkorenkaassa tai sisärenkaassa käyttämällä kansainvälisesti edistyneellä tekniikalla kestämään DC-jännitettä. Laakeri on yleensä jaettu sisärenkaalla päällystettyyn eristettyyn laakeriin ja ulkorenkaalla päällystettyyn sähköeristettyyn laakeriin. Sen peruspinnoite voi kestää jopa 1000 voltin DC-jännitteen. Tämän laakerin vaatimukset vastaavat kansainvälisiä vaatimuksia. Tällaisia sähköeristettyjä laakereita suunnitellee SKF. (CoatMaster, 2019)

Kuva 11 sähköeristetystä laakerista. (Onninen)

Sähköeristetylle laakerille käytettään erityistä ruiskutusprosessia. Laakerin ulkopinta on ruiskutettu korkealaatuisella pinnoitteella, jolla on vahva sidosvoima alustaan ja hyvä eristyskyky. Pinnoitteen ominaisuuksia ovat laakerin induktiovirran sähköisen eroosion välttäminen, estää virran aiheuttamia vahinkoja laakeroinnin rasvaan, pyörintäelementtiin ja kulkurataan. Sähköisesti eristetty laakeri pidentää laakerin käyttöikää. (CoatMaster, 2019)

Sähköeristettyjä laakereita käytetään laajalti sähkömoottoreissa ja generaattoreissa, erityisesti taajuusmuuttajakäyttöisissä moottoreissa (CoatMaster, 2019). Sähköeristetyt laakerit lisäävät riskiä sähkövuodon siirtymiseen käytettävään laitteeseen. Sähkömoottoria pidetään niin sanotusti sulakkeena, sillä käytettävä laite on yleensä hankalammin vaihdettavissa sekä arvokkaampi. Lähtökohtaisesti tulisi käyttää moottorivalmistajan vakiolaakereita normaalikäytöissä ja taajuusmuuttajakäytöissä vähintään N-päässä on oltava eristetty laakeri. (Raatikainen;Heikkinen;& Turunen, 2023)

Laakerit vaihdetaan kuntoon perustuen, pois lukien suurjännitekoneet. Suurjännitekoneissa laakereiden vaihto tehdään aikaan perustuvan huoltosuunnitelman mukaisesti. (Raatikainen;Heikkinen;& Turunen, 2023)

4.5 Ferriittirenkaat

Ferriittirenkaat kuva 12 ovat suodattimia, joilla on ferromagneettiset sydämet. Ne ovat renkaan muotoisia, mitkä sijoitetaan yhteismuotoiseen virtapiiriin. Tämän tarkoitus on lisätä yhteismuotoisen virtapiirin impedanssia, jotta voidaan loiventaa yhteismuotoisen jännitepulssin käyrämuotoa. (Kainulainen, 2012)

Kuva 12 Suurtaajuisien signaalien vaimentamiseen käytettävä ferriittirengas. (Altium, 2023)

Ferriittirenkaiden toimintaperiaate perustuu faraydyn lakiin. Tämä tarkoittaa sitä, että johtimen ympärillä oleva magneettisydän indusoi vastasähkömotorisen voiman suurtaajuiselle signaalille läsnä ollessa, mikä olennaisesti vaimentaa ferriitin taajuusvastetta. (Altium, 2023)

Ferriittirenkaiden impedanssit ovat induktiivisia, jonka takia ferriittirenkaita käytetään vaimentamaan suurtaajuisia signaaleja elektronisissa komponenteissa. Ferriittirenkaat asennetaan johtimiin, joista ne vähentävät suurtaajuista kohinaa, jotka ovat virtaliitännässä tai jotka tulevat tasavirtalähteestä. Ferriittirenkaiden käyttö on yksi lähestymistapa kohinan vaimentamiseen esimerkiksi hakkuriteholähteistä tai inverttereistä. Ferriittirenkaiden käyttö ferriittisuodattimina estää ja poistaa johtuneen EMI:n (Altium, 2023)

5 MITTAUKSET

Työssä mittauksen kohteena on Kuopion Vesi Oy Itkonniemen vesilaitoksen PU-801 verkostovesipumppu. Verkostovesipumppujärjestelmään kuuluu mm. Aqua drive taajuusmuuttaja sekä ABB:n 250 kW oikosulkumoottori.

Mittaus tehdään kaksi kertaa. Ensimmäisen mittauskerran tarkoituksena on tutkia, esiintykö kohteessa laakerivirtoja. Ensimmäisten mittauksien jälkeen kohteeseen tehdään lisämaadoitus laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti. Korjauksien jälkeen tehdään toisen kerran samanlainen mittaus. Toisella mittauskerralla tutkitaan, onko ensimmäisen mittauskerralla esiintyneet laakerivirrat vähentyneet tai hävinneet kokonaan.

Moottorista mitataan virran ja jännitteiden arvoja moottorin rungon ja akselin välistä. Oskilloskoopilla saadaan selkeä kuvaaja moottorin virroista ja jännitteistä, joista voidaan nähdä mahdolliset laakerivirta esiintymät.

Laakerivirtoja voidaan hallita lisäämällä erilaisia suojauksia, joista on kerrottu luvussa 4 Laakerivirtojen hallitseminen. Näitä vaihtoehtoja ovat esimerkiksi ferriittirenkaat, sinisuodatin, emc suojaukset sekä lisämaadoitukset. Korjauksien jälkeen mittaus tehdään uudestaan, jotta voidaan havaita mahdolliset laakerivirtojen vähentymiset. Suojauksien lisääminen, millä hallitaan laakerivirtoja, riippuu kohteessa esiintyvistä virroista. Tämä tarkoittaa sitä, esiintyykö siellä kiertovirtoja, maadoitusvirtoja vai kapasitiivisia purkausvirtoja.

Mittauksissa on kiinnitettävä erityistä huomiota työturvallisuuteen, koska operoidaan suuritehoisen moottorin pyörivän akselin läheisyydessä.

5.1 Mittalaite ja mittapäät

Laakerivirtoja havaitaan mittaamalla oikosulkumoottorin akselin ja rungon välinen jännite-ero, eli akselijännite. Akselijännitteessä tapahtuvat äkilliset suuret muutokset kertovat laakerivirroista. Nämä muutokset ovat käytännössä laakerin läpi meneviä sähköpurkauksia. (Aegis, 2019)

Laakerivirtojen mittaaminen suoraan moottorista on mahdotonta. Jos moottorista halutaan tarkistaa, esiintyykö siellä suurtaajuisia laakerivirtoja, nämä tarkistukset voidaan tehdä kenttämittauksilla. Mittauslaitteiden taajuusalueen on oltava ainakin 10 kHz - 2 MHz ja sillä on pystyttävä havaitsemaan virran huippuarvot, mitkä ovat luokaltaan 150 A – 200 A ja RMS-arvot mitkä ovat luokaltaan mA. (ABB)

Tässä työssä laakerivirtoja mitataan käyttämällä Rohde & Schwarz RTH1004 oskilloskooppia, PEM CMC06 virtamuuntimia eli Rogowskin keloja sekä maadoitusharjaa.

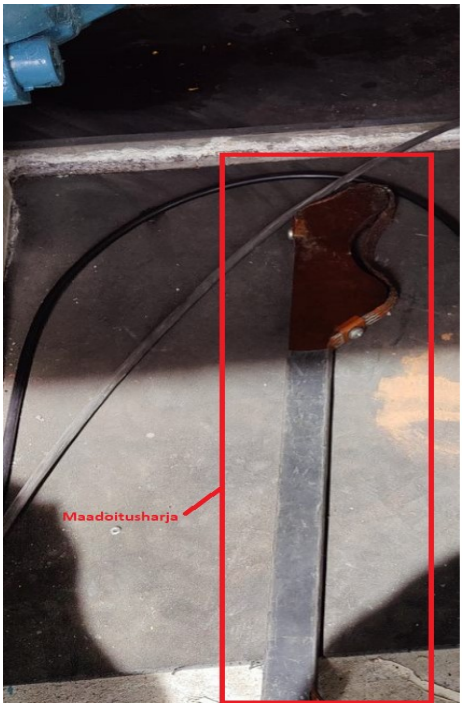
Kuva 13 Mittauksissa käytetty Rohde & Schwarz RTH1004 oskilloskooppi.

Oskilloskoopilla kuva 13 saadaan muodostettua kuvaajia jännitteistä ja virroista, joista voidaan helposti havaita mitattavan suureen äkillisiä muutoksia. Oskilloskoopilla tehdään laakerivirtoihin liittyen neljä erilaista mittausta. Mitatut arvot ovat summa- ja akselivirta, kiertovirta, akselijännite sekä akselijännite ja virranmittaus yhtäaikaisesti. Nämä mittaustulokset antavat mahdollisuuden tutkia kohteen mahdollisia laakerivirtaesiintymiä monesta eri näkökulmasta.

Mittauksissa käytettiin mittalaitteen lisäksi kahta Rogowskin kelaa kuva 14 sekä maadoitusharjaa kuva 15. Rogowskin kelat mahdollistavat helposti virran ja jännitteiden mittaukset, joiden avulla voidaan tutkia laakerivirtaesiintymiä.

Kuva 14 PEM CMC06, Rogowskin kela.

Toinen keloista oli suurempi, joka mahdollisti virran ja jännitteiden mittaukset turvallisesti akselilta.



Kuva 15 Maadoitusharja.

Maadoitusharja mahdollisti turvallisen kiertovirran, akselin jännitteen sekä yhtäaikaisen akselijännitteen ja virranmittauksen. Maadoitusharja laitettiin pyörimissuunnan mukaisesti kiinni pyörivään oikosulkumoottorin akseliin.

5.2 Mittauksen turvallisuus

Mittauksia tehdessä tulee ottaa erityisesti huomioon sähkö- ja työturvallisuus. Mittaukset tehdään käynnissä olevaan moottoriin. Tämä tarkoittaa sitä, että mittausympäristössä on jännitteellisiä osia,

joihin ei tule koskea. Mittauskelat tulee asettaa turvallisesti siten, että niillä ei ole mahdollisuutta ottaa kontaktia pyörivän akselin kanssa. Akselin virran ja jännitteen mittauksia tehdessä, kela on hyvä asettaa esimerkiksi akselin suojan ympärille. Akselin suojaa kannattaa raottaa sen verran, että maadoitusharja mahtuu paikoilleen.

Mittauksia tehdessä tulee suojautua työympäristön mukaan, esimerkiksi mittausympäristö voi olla meluinen, joten kannattaa käyttää kuulosuojaimia, mikä estää mahdollisten kuulovaurioiden syntymisen.

5.3 Mittauskytkennät

5.3.1 Summa ja akselivirran mittaus

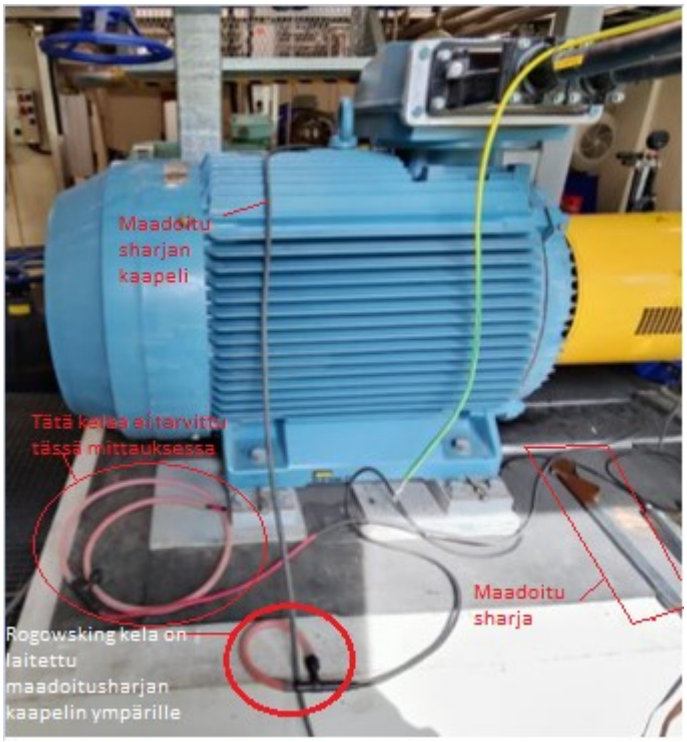
Kuva 16 Summa ja akselivirran mittauskytkentä

Tässä kuvan 16 mittauksessa käytettiin kahta rogowskin kelaa. Pienempi rogowsin kela laitettiin kaapeleiden ympärille, mikä mittasi summavirtaa. Suurempi rogowskin kela laitettiin kelaisen akselin suojan ympärille kuvan 19 mukaisella tavalla. Tällä mitattiin akselissa esiintyviä virtoja.

Summavirta kertoo, että kuinka paljon virtaa menee moottorille sekä kuinka paljon sieltä palautuu virtaa. Akselilta mitatut arvot kertovat, kuinka paljon virtaa purkautuu laakereiden läpi akselin kautta pois moottorilta.

Tässä mittauksessa mitattiin summavirran huippuarvo (peak) ja summavirran tehollisarvo eli (RMS). Samat huippu- ja tehollisarvon mittaukset tehtiin akselivirralle. Sama mittaus tehtiin myös sen jälkeen, kun lisämaadoitus oli lisätty. Moottorin ja taajuusmuuttajan rungot maadoitettiin samaan maadoituskiskoon, joka sijaitsee kaapelihyllyllä.

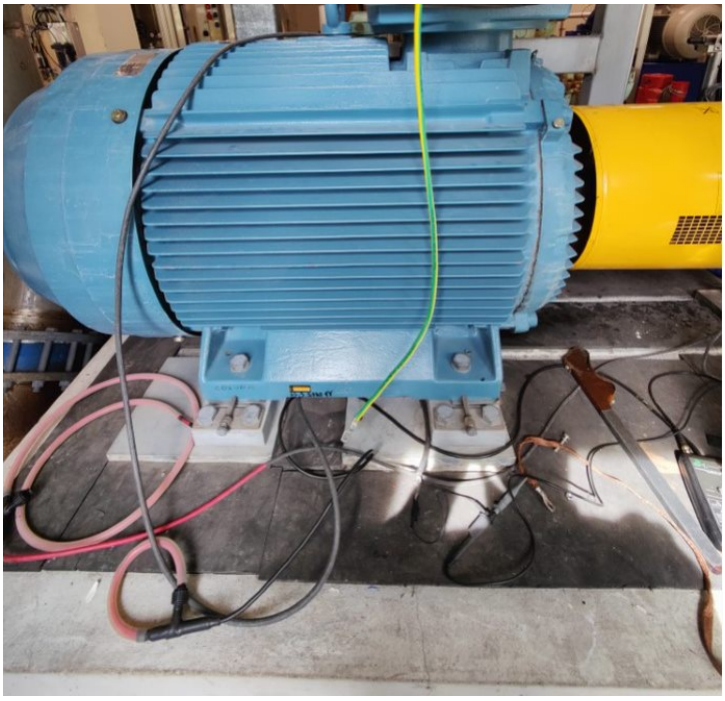
5.3.2 Kiertovirran mittaus



Kuva 17 Kiertovirran mittauskytkentä

Kiertovirran mittaus toteutettiin kuvan 17 mukaisella kytkennällä. Moottorin runkoon asennettiin pultilla nostosilmukan viereen maadoitusharja. Maadoitusharjan ympärille laitettiin rogowskin kela, jonka jälkeen maadoitusharja laitettiin pyörivään akseliin, minkä jälkeen pystyttiin havaitsemaan kiertovirtaa. Tämä mittaus suoritettiin kaksi kertaa, missä mitattiin kiertovirran huippu- ja RMS-arvot.

5.3.3 Akselijännitteen mittaus



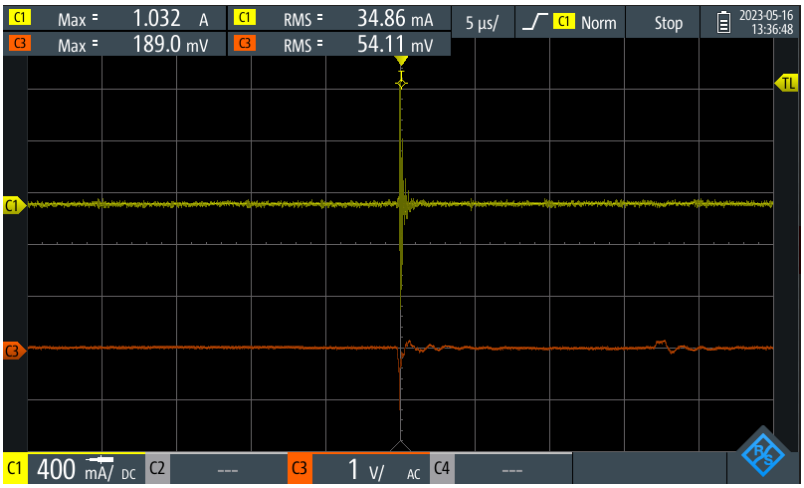
Kuva 18 Akselin jännitteen mittauskytkentä

Akselin jännitteen mittauskytkentä kuva 18 oli lähes samanlainen kuin kiertovirran mittauksessa. Akselin jännitteen mittauksessa kytkentään lisättiin mittalaitteiston mukana tullut mittakärki. Mittakärki laitettiin maadoitusharjan kaapelin ja maadoitusharjan väliin. Tällöin pystyttiin mittaamaan moottorin akselilta jännite käyttäen maadoitusharjaa. Mittauksessa mitattiin akselin jännitteen huippu ja RMS-arvo

5.3.4 Akselijännite ja virran mittaus yhdessä

Kuva 19 Akselijännitteen ja virran yhtäaikaisen mittauksen kytkentä

Akselijännitteen ja virran yhtäaikainen mittaus suoritettiin kuvan 19 mukaisella tavalla. Tässä mittauksessa kytkentä on muuten samanlainen kuten kuva 18, mutta tässä mittauksessa on lisätty rogowskin kela akselin ympärille mittaamaan akselivirtaa jännitteen lisäksi. Mittauksessa pystyttiin tutkimaan kuinka virran ja jännitteen muutokset vaikuttavat toisiinsa. Muutokset voidaan havainnollistaa tutkimalla kuvaa 20. Kuvassa keltainen käyrä on akselivirta ja oranssi käyrä on akselijännite.



Kuva 20 Akselijännitteen ja virran käyrät lisämaadoituksen kanssa. (Monthan, 2023)

Akselivirran amplitudi on 400 mA/ruutu ja akselijännitteen amplitudi on 1 V/ruutu. Signaalin pituus on 5 mikrosekuntia.

6 MITTAUSTULOKSET

6.1 Mittaustulokset ennen ja jälkeen korjausmuutosten

Työssä mittaukset tehtiin kaksi kertaa. Ensimmäisen kerran tehtiin mittaus, kun kohteeseen ei ollut lisättynä lisämaadoitusta. Toisella mittauskerralla kohteeseen oli lisätty lisämaadoitus. Lisämaadoitus tehtiin 16 mm^2 kupari kaapelilla. Näiden mittauksien tarkoituksena on tutkia muutamasta eri näkökulmasta, esiintyykö kohteessa laakerivirtoja ja kuinka lisämaadoituksen lisääminen vaikuttaa jännitteen ja virran arvoihin.

Molemmilla mittauskerroilla mitattiin summa ja akselivirtaa, kiertovirtaa ja akselin jännite. Näistä saadut tulokset mahdollistavat laakerivirtojen tutkimisen. Opinnäytetyössä tutkittavat tulokset ovat mittauksista saatuja raaka-arvoja, jotka ovat suuntaa antavia tuloksia. Tuloksiin tulee tehdä filteröinnit, joiden avulla tuloksia on paljon parempi tutkia.

6.1.1 Summa ja akselivirta

Summavirtaa mittaamalla voidaan tutkia, kuinka paljon virtaa syötetään moottorille ja kuinka paljon virtaa tulee pois moottorista. Akselilta mitattu virta tarkoittaa sitä, kuinka paljon virtaa purkautuu moottorin akselin kautta pois. Tämä on yleensä lyhyin reitti, mitä kautta akselivirta pääsee purkautumaan pois moottorista.

Taulukko 1 Mittaustulokset summa- ja akselivirroista

	Mittaustulokset: Summa- ja akselivirta					
	Ilman lisämaadoitusta				Lisämaadoituksen kanssa	
	Peak	RMS			Peak	RMS
Summavirta	2,118 A	68,4 mA			429,8 mA	49,0 mA
Akselivirta	1,092 A	21,4 mA			329,4 mA	25 mA

Taulukkoa 1 katsomalla huomataan, että summa- ja akselivirran huippuarvot ovat pienentyneet huomattavasti sekä tehollisarvoissa on tapahtunut pientä kasvun muutosta. Tehollisarvojen näkökulmasta katsottuna virtojen arvot voivat vaikuttaa laakerin käyttöikään.

Taulukko 2 Laakerivirran tehollisarvo (Psk-standardisointi, 2004)

Laakerivirran tehollisarvo I_{rms}	Haitallisuusluokitus
< 20mA	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään.
20mA … 50mA	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.
> 50mA	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään.

Tarkastellessa taulukkoa 2 voidaan todeta, että moottorissa akselivirran suuruus voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.

Taulukko 3 Laakerivirran huippuarvo (Psk-standardisointi, 2004)

Laakerivirran huippuarvo I_p	Haitallisuusluokitus
< 1 A	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään.
1 A … 2 A	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.
> 2A	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään.

Kun tutkitaan saatuja akselivirran huippuarvon tuloksia Taulukko 1 ja niitä verrataan Taulukko 3 voidaan todeta, että lisämaadoituksen lisääminen paransi huomattavasti tilannetta, minkä seurauksena kyseinen virta ei vaikuta laakerin käyttöikään.

6.1.2 Akselijännite

Akselijännitteen arvon nousua taulukko 4 voidaan selittää luvussa 3.2.3 käsitellyn teorian pohjalta vertaamalla akselivirran ja summavirran muutokseen taulukko 1. Tässä tilanteessa virran arvoja tulkitaan kapasitiivisina virtoina, sillä on kyse akselijännitteestä. Lisämaadoituksen seurauksena yhteismuotoisen jännitteen sisäinen jännitteen jako kasvaa, mikä näkyy jännitteen arvon nousuna. Lisämaadoituksen asentaminen puolestaan pienensi kapasitiivisia virran arvoja.

Taulukko 4 Akselijännitteen mittaustulokset

Mittaustulokset: Akselijännite					
Ilman lisämaadoitusta				Lisämaadoituksen kanssa	
Peak	RMS			Peak	RMS
567,8 mV	18,2 mV			1,544 V	19,2 mV

Lisämaadoituksen asentaminen huononsi tilannetta lähtötilanteesta, sillä akselijännitteen arvo nousi huomattavasti. Verrattaessa mittauksissa saatuja akselijännitteen arvoja taulukkoon 5 voidaan kuitenkin todeta, että akselijännitteet eivät ole haitallisia tässä tilanteessa.

Taulukko 5 Vaihtojännitepulssien haitallisuusasteet (Psk-standardisointi, 2004)

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

6.1.3 Kiertovirta

Moottorissa esiintyviä kiertovirtaa voidaan verrata akselilla esiintyvät jännitteen avulla. Edellä käydyn teorian perusteella voidaan todeta, että kiertovirta virtaa rungon, laakerien sekä staattorin muodostamaa kehää silloin kun jännite on tarpeeksi suuri läpäistäkseen laakerin öljykalvon.

Taulukko 6 Kiertovirran mittaustulokset

	Mittaustulokset: Kiertovirta				
Ilman lisämaadoitusta				Lisämaadoituksen kanssa	
Peak	RMS			Peak	RMS
517,6 mA	53,2 mA			536,5 mA	85 mA

Kiertovirran muutosta taulukko 6 voidaan selittää akselijännitteen muutoksen avulla. Kun katsotaan taulukkoa 4 huomataan että akselilla esiintyvän jännitteen arvon suurentuessa, se mahdollistaa moottorissa ilmenevän kiertovirran arvon suurentumisen. Eli kiertovirran näkökulmasta katsottuna lisämaadoituksen tekeminen huononsi asiaa.

Verrataan kiertovirran tuloksia taulukko 6 ensin taulukkoon 2. Tämän avulla voidaan todeta, että kohteessa esiintyy haitallinen määrä kiertovirtaa mikä vahingoittaa kohteen laakereita. Vaikuttaa erityisesti laakerien käyttöikään. Kun taas verrattaessa taulukkoa 3 kiertovirran huippuarvot eivät vaikuta merkittävästi laakerien käyttöikään.

7 YHTEENVETO

Työn aikana perehdytystä teoriasta oli paljon hyötyä mittauksiin. Ennen mittauksia oli perehdytty mittalaitteeseen sekä mittapäihin millä mahdollisesti voisi toteuttaa mittaukset. Mittaukset tehtiin yhteistyönä ABB:n toimesta. Heillä oli samanlainen mittalaite sekä mittapäät mihin työn aikana oli perehdytty, joten mittaukset onnistuivat hyvin.

Opinnäytetyössä mittaustulokset, joita on analysoitu ovat alustavia tuloksia. Mittaustuloksista osa muuttui paremmaksi lisämaadoituksen jälkeen, eli ne eivät aiheuta ongelmia laakerin käyttöikään. Kuitenkin suurin osa saaduista mittaustuloksista vaikuttavat laakerin käyttöikään.

Näiden mittauksien pohjalta voidaan todeta, että kohteeseen PU-801 verkostovesipumppuun, pitäisi tehdä erilainen muutos kytkentään, sillä lisämaadoituksen tekeminen huononsi laakerivirta tilannetta parantamisen sijaan.

Mittaustulokset analysoitiin alustavien tuloksien pohjalta, sillä kiireellisen aikataulun takia tarkempia mittaustuloksia ei ollut mahdollista saada. Mittaustuloksille olisi ollut tarkoitus tehdä vielä filtteröintejä eli suodatuksia, mitkä olisivat antaneet tarkemman kuvan kohteen laakerivirta tilanteesta.

Jatkotoimenpiteinä verkostovesipumpulle tämän työn lisäksi tulisi tehdä lisää muutoksia tarkempien tuloksien pohjalta. Tarkemmat tulokset, antaisivat paremman käsityksen siitä, mitä verkostovesipumpun kytkennöille tulisi tehdä lisämaadoituksen lisäksi.

Opinnäytetyön tekeminen on antanut valtavasti kokemusta ja osaamista käsiteltyjen tietojen käyttämistä sovelluksiin, tässä tapauksessa mittauksien tekemiseen. Opinnäytetyö mahdollisti ymmärtämään laakerivirtoja, miksi niitä syntyy sekä miten niihin voidaan vaikuttaa. Tämän työn ansiosta tulevaisuudessa on helpompi lähestyä mahdollisia laakerivirtaongelmia.

LÄHTEET

ABB. (ei pvm). PDS-käyttöjen asennus ja kokoonpano EMC-vaatimusten mukaan . Haettu 12. 2. 2023 osoitteesta ABB tekninen opas nro 3: https://library.e.abb.com/public/bb3f0dff646d5948c1256d2800411386/TechnicalGuideNo_3FI.pdf

ABB. (ei pvm). Tekninenopas nro 5. Haettu 17. 1. 2023 osoitteesta Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä: https://library.e.abb.com/public/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopasnro5.pdf

Aegis. (14. 2. 2018). Electro static Technology. Haettu 16. 1. 2023 osoitteesta Discovering and Preventing bearing current damage: https://blog.est-aegis.com/discovering-and-preventing-bearing-current-damage

Aegis. (11. 7. 2019). Testing for Bearing Currents. Haettu 10. 5. 2023 osoitteesta blog.est-aegis.com: https://blog.est-aegis.com/testing-for-bearing-currents

Altium. (10. 1. 2023). How do ferrite beads work and how do yo choose right one? Haettu 31. 1. 2023 osoitteesta resources.altium.com: https://resources.altium.com/p/how-do-ferrite-beads-work-and-how-do-you-choose-right-one#what-is-a-ferrite-bead-and-how-do-ferrite-beads-work

Aspencore. (ei pvm). Power insulated gate bipolar transistor. Aspencore. Haettu 4. 1. 2023 osoitteesta https://www.electronics-tutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html

CoatMaster. (27. 11. 2019). What is electrically insulated bearing. Haettu 30. 1. 2023 osoitteesta china-bearing-manufacturer.com: https://www.china-bearing-manufacturer.com/what-is-electrically-insulated-bearing/

Collins, D. (8. 10. 2020). Motioncontroltips. Haettu 4. 1. 2023 osoitteesta What are bearing currents and what causes them?: https://www.motioncontroltips.com/what-are-bearing-currents-and-what-causes-them/

Electric, J. (ei pvm). IEC standardi oikosulkumoottorille. IEC Quick Reference Chart. James Electric. Haettu 10. 1. 2023 osoitteesta https://jameselectric.ca/help/iec-quick-reference-chart/

(ei pvm).EMI/RFI suotimet. scemosystems. Haettu 14. 2. 2023 osoitteesta https://scemosystems.fi/fi/s%C3%A4hk%C3%B6laitteet/emi--rfi-suotimet/control-techniques-worldwide-42001051-3-vaiheinen-rfi--emi-suodin-50a-3x480vac

EMIS. (ei pvm). Reactors and Filters used in VFD and motor protection. Haettu 26. 1. 2023 osoitteesta emisindia.com: https://www.emisindia.com/insights/reactors-and-filters-used-in-vfd-and-motor-protection/

Eurolab. (ei pvm). Mikä on EMC. Haettu 25. 1. 2023 osoitteesta www.emctestleri.com: https://www.emctestleri.com/fi/sss/emc-nedir

Heco. (2016). What are electric motor shaft circulating currents. Heco. Haettu 10. 1. 2023 osoitteesta https://hecoinc.com/what-are-electric-motor-shaft-circulating-currents/

Hämäläinen, T. (2010). Vaihtosähkösuodatus invertterin lähdössä. Tampere: theseus.fi. Haettu 24. 5. 2023 osoitteesta https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/12802/Hamalainen_Toni.pdf?sequence=1

Kainulainen, K. (2012). Monimoottorikäyttöjen suojaukset, mitoitus ja ohjeistus. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, Teknillinen tiedekunta. Haettu 26. 1. 2023 osoitteesta https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/77549/diplomity%C3%B6_Kati_Kainulainen_2012_lopullinen.pdf?sequence=1

Kanninen, J. (2011). Laakerivirrat kestomagneettitahtikoneissa. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Lappeenranta: lutpub.lut.fi. Haettu 17. 1. 2023 osoitteesta https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/72664/Kanninen_Jarno%20Dipl.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Kuopion Vesi Oy. (ei pvm). tietoa vedestä, veden laatu. Haettu 23. 5. 2023 osoitteesta kuopionvesi.fi: https://www.kuopionvesi.fi/tietoa-vedesta/veden-laatu/

Monthan, J. (2023). Akselijännite ja virran käyrät. ABB. Haettu 22. 5. 2023

Nagda, V. (ei pvm). Effects of long distance cables between VFD and motors. Haettu 7. 2. 2023 osoitteesta instrumentationtools.com: https://instrumentationtools.com/effects-of-long-distance-cables-between-vfd-and-motor/

(2020).Network harmonics. VFD harmonic spectrum. MB drive services. Haettu 13. 2. 2023 osoitteesta https://mb-drive-services.com/network_harmonics_vfd_harmonic_spectrum/

Onninen. (ei pvm). Sähköeristetty laakeri. Onninen. Noudettu osoitteesta https://www.onninen.fi/akn-urakuulalaakeri-sahkoeristetty-6212-c3sq771-60x110x22/p/ANS405

Pesonen, J. (5. 4. 2023). Haastattelu laakerivirtoihin liittyen. (J. Pursiainen, Haastattelija) Haettu 4. 5. 2023

Psk-standardisointi. (2. 11. 2004). PSK standardisointi. Haettu 19. 5. 2023 osoitteesta Standardi PSK 7708: https://psk-standardisointi-fi.ezproxy.savonia.fi/Standard/Ryhma77/PSK_7708_2p.pdf

Raatikainen, P.;Heikkinen, H.;& Turunen, M. (28. 3. 2023). Haastattelu laakerivirroista. (J. Pursiainen, Haastattelija) Haettu 4. 5. 2023

Rautaharju, M.;& Tähti, K. (2013). Historiikki. Haettu 22. 5. 2023 osoitteesta kuopionvesi.fi: https://www.kuopionvesi.fi/tietoa-vedesta/historian-havinaa/

Sandwell, G. (2002). Kapasitiivinen virta. Vibescorp. Haettu 10. 1. 2023 osoitteesta https://www.vibescorp.ca/learn-about/shaft-currents/

Schaffner. (ei pvm). Sine wave filter solutions for motor drive applications. Haettu 26. 1. 2023 osoitteesta docs.rs-online.com: https://docs.rs-online.com/1309/0900766b81523b4e.pdf

Shah, A. (21. 2. 2011). Proper cabling a critical choice for VFD systems. Haettu 6. 2. 2023 osoitteesta plantengineering.com: https://www.plantengineering.com/articles/proper-cabling-a-critical-choice-for-vfd-systems/

Stone, B. (2020). Kiertovirrat. Understanding circulating currents. Helwig Carbon. Haettu 10. 1. 2023 osoitteesta https://www.helwigcarbon.com/understanding-circulating-currents/

SähköNet. (ei pvm). taajuusmuuttajat. Haettu 25. 1. 2023 osoitteesta blogit.gradia.fi: https://blogit.gradia.fi/sahkonet/sahko-ja-automaatioasennukset/oppimistehtavat/teollisuuden-sahkoasennukset/moottorikaytot/taajuusmuuttajat/

Taaning-Grundholm , F. (2016). Laakerivirran aiheuttama vahinko. Bearing current. Empoweringpumps. Haettu 16. 1. 2023 osoitteesta https://empoweringpumps.com/bearing-current-damage-fact-or-fiction/

Trafomic. (ei pvm). Siniaaltosuodatin. Trafomic. Noudettu osoitteesta https://trafomic.fi/tuotteet/siniaaltosuodatin/

tukes. (ei pvm). tukes.fi. Haettu 25. 1. 2023 osoitteesta sähkömagneettinen yhteensopiivuus - EMC: https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkomagneettinen-yhteensopivuus-emc

Vfds.org. (ei pvm). Moottorin ja taajuusmuuttajan välisen kaapelin pituus. Haettu 18. 1. 2023 osoitteesta Vfds.org: http://www.vfds.org/cable-length-between-vfd-and-motor-820583.html

Westerlund, M.;& Fyhr, M. (ei pvm). new.abb.com. Haettu 5. 1. 2023 osoitteesta How to deal with presistent bearing currents: https://new.abb.com/motors-generators/iec-low-voltage-motors/articles/bearing-currents