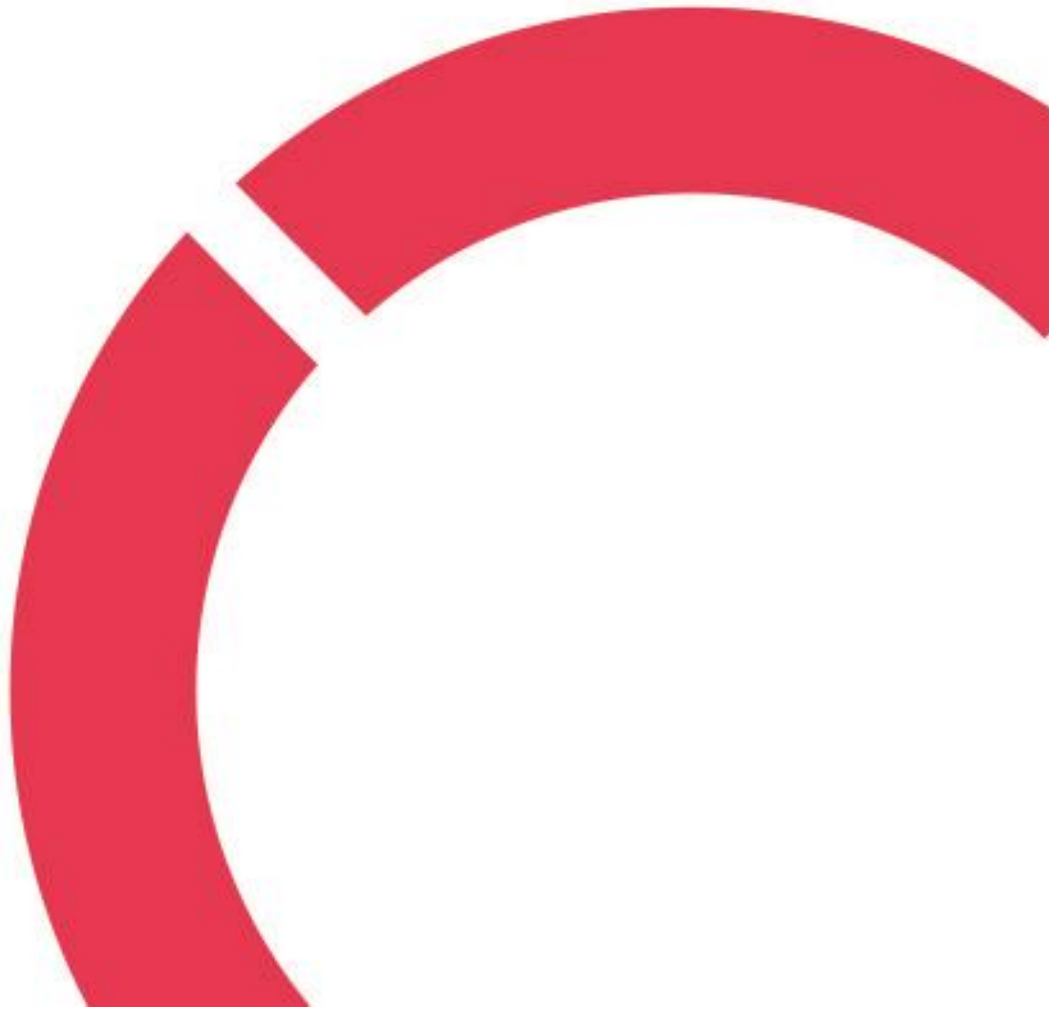


Eemil Mulari

EMC:N HALLINTA PROSESSITEOLLISUUDESSA

EMC-ohjeistus

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Toukokuu 2025**



TIIVISTELMÄ OPINNÄYTETYÖSTÄ

Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2025	Tekijä Eemil Mulari
Koulutus Insinööri (AMK) Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi EMC:N HALLINTA PROSESSITEOLLISUUDESSA. EMC-ohjeistus.		
Työn ohjaaja Kari Saaranen		Sivumäärä 46
Työelämäohjaaja Toni Salo		
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin työnantajalleni Umicore Finland Oy:lle, joka on merkittävä kobolttinjalostamo sekä kobolttituotteiden ja akkumateriaalien valmistaja Kokkolan suurteollisuusalueella. Työssä syvennyttiin sähkömagneettisen yhteensopivuuden säätelyyn, erilaisiin sähkömagneettisiin häiriöihin, häiriöiden kytkeytymistapoihin ja EMC:n hallintaan prosessiteollisuudessa. Pääpaino työssä oli prosessiteollisuuden 400 V:n sähköasennuksissa ja laajasti käytössä olevien taajuusmuuttajakäyttöjen häiriönsuojauksessa käsittäen häiriöiden ehkäisyyn ja niiltä suojaamiseen liittyviä toimenpiteitä.</p> <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen, EMC-suojaukseen ja luoda yleispätevä ohjeistus sähkömagneettisen yhteensopivuuden hallintaan prosessiteollisuuden toimintaympäristössä yhdistämällä aiheeseen olennaista teorian tietoa yleisiin toimiviksi todettuihin ja suositeltuihin käytännön toimiin. Aiheeseen liittyvän kirjallisuuden, verkkolähteiden ja laitevalmistajien dokumenttien avulla työstä saatiin luotua kattava ja monipuolinen tietopaketti erityisesti prosessiteollisuuden näkökulmasta. Työtä voidaan hyödyntää yleispätevänä ohjeistuksena EMC:n hallinnassa sellaisissa tilanteissa, joissa sähkömagneettisen yhteensopivuuden huomioiminen on olennaista, ja työ antaa lisäksi hyödyllistä teorian tietoa etenkin taajuusmuuttajakäyttöjen EMC-ongelmista.</p> <p>EMC-suojauksessa määriteltävien toimenpiteiden ollessa hyvin tapauskohtaisia, koostuu opinnäytetyön ohjeistuksen sisältö pääosin yleispätevistä perusmenetelmistä, koska käytettävät toimenpiteet tulee määritellä tapauskohtaisesti harkiten ja laitevalmistajien ohjeita noudattaen.</p>		
Asiasanat EMC-suojaus, Prosessiteollisuus, Sähkömagneettinen häiriö, Sähkömagneettinen yhteensopivuus, Taajuusmuuttaja		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date 5/2025	Author Eemil Mulari
Degree programme Bachelor of Engineering, Electrical and Automation Engineering		
Name of thesis EMC MANAGEMENT IN THE PROCESS INDUSTRY. EMC-Guidance.		
Centria supervisor Kari Saaranen	Pages 46	
Instructor representing commissioning institution or company Toni Salo		
<p>This thesis was created for my employer Umicore Finland Oy, a major cobalt refinery and manufacturer of cobalt products and battery materials in the Kokkola industrial park. The work focused on the regulation of electromagnetic compatibility, various electromagnetic disturbances, methods of connection of disturbances, and EMC protection in the process industry. The focus of the work was on the process industry's 400-volt electrical installations and the interference protection of widely used AC drives, including measures related to the prevention and protection against interference.</p> <p>The purpose of this thesis was to familiarize ourselves with electromagnetic compatibility, EMC protection, and to create general guidelines for electromagnetic compatibility management in the operating environment of the process industry by combining relevant theoretical knowledge with general proven and recommended practical actions. With the help of related literature, online sources and documentation from equipment manufacturers, a comprehensive and versatile information package was created from the perspective of the process industry. The work can be utilized as a general guideline for EMC management in situations where consideration of electromagnetic compatibility is essential, and the work also provides useful theoretical information, especially on EMC problems in AC drives.</p> <p>Because the measures to be defined in EMC protection are very case-specific, the content of the thesis instructions mainly consists of basic generic methods, because the measures to be used must be defined case-by-case with consideration and following the instructions of the equipment manufacturers.</p>		

Key words EMC protection, Process industry, Electromagnetic interference, Electromagnetic compatibility, Frequency converter
--

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

DIGITAALINEN JA ANALOGINEN SIGNAALI

Digitaalinen signaali on joko 0 tai 1, ja analoginen signaali on portaaton ja jatkuva signaali, joka voi saada mitä tahansa arvoja tietyllä välillä.

ESTOKELAPARISTO

Yleinen ratkaisu loistehon kompensointiin teollisuudessa, jolla on myös yliaaltoja suodattavaa vaikutusta. Laitteiston jokainen kompensointiporras koostuu sarjaan kytketyistä kuristimesta ja kondensaattorista.

HAJAKAPASITANSSI

Ei toivottu kapasitanssi, jota voi esiintyä sähköpiireissä eri komponenttien välillä. Ilmiö voi aiheuttaa esimerkiksi häiriöitä ja virhetoimintoja.

IMPEDANSSI

Vaihtovirralla kohdistuva vastus virtapiirissä, joka koostuu resistanssista ja reaktanssista. Reaktanssi koostuu induktanssista ja kapasitanssista, ja se voi olla joko induktiivista tai kapasitiivista reaktanssia. Reaktanssi on myös riippuvainen vaihtovirran taajuudesta piirin komponenttien lisäksi.

KESKINÄISINDUKTANSSI

Suure, joka kuvaa kahden kelan tai johtimen välistä magneettista vuorovaikutusta.

LOISTEHO

Vaihtosähköpiireissä työtä tekemätön tehon osa, joka syntyy jännitteen ja virran vaihekulman erosta esimerkiksi induktiivisten kuormien vaikutuksesta. Loisteho ja työtä tekevä pätöteho muodostavat näennäistehon, joka kuvaa kokonaistehoa.

MAGNEETTIVUO

Suure, joka ilmaisee magneettikentän voimakkuuden tietyn pinnan lävitse.

MAGNEETTIKENTTÄ

Ilmiö, joka voi syntyä jollekin alueelle sähkövirrasta tai sähkökentän muutoksista aiheuttaen liikkuville varauksille voiman.

OIKOSULKUMOOTTORI

Yleisin teollisuudessa käytetty sähkömoottori. Toiminta perustuu staattorikämmityksissä syntyneeseen pyörivään magneettivuohon, joka magnetoitii roottorin siihen indusoituneella sähkövirralla. Magnetoitunut roottori seuraa staattorin pyörivää magneettivuota, jolloin moottorin akseli pyörii.

RF-HÄIRIÖ

Radiotaajuushäiriö, joka syntyy tyypillisesti sähkömagneettisesta säteilystä aiheuttaen häiriöitä sähköisiin laitteisiin.

SÄHKÖKENTTÄ

Ilmiö, joka syntyy sähkövarauksista, jolloin tietyllä alueella hiukkasten vuorovaikutukset välittyvät muille hiukkasille, jolloin hiukkasiin kohdistuu sähköisiä voimia.

PROFINET IO

Profinet on johtava kenttäväyläprotokolla ja Ethernet-standardi teollisuudessa laitteiden ja automaatiojärjestelmien väliseen kommunikointiin. Profinet IO tarkoittaa kommunikointiprotokollaa ohjaimen ja laitteiden välillä, jolla saavutetaan nopea ja reaaliaikainen tiedonsiirto.

TRANSIENTTI

Nopea muutos esimerkiksi virrassa tai jännitteessä, jolla ei ole usein ole toistuvuutta sen ollessa luonteeltaan satunnainen.

FARADAYN HÄKKI

Johtavista materiaaleista muodostettu suljettu tila, alue tai rakenne, joka antaa hyvän suojan esimerkiksi ulkopuoliselta sähkömagneettiselta säteilyltä sekä säteilyn vapautumiselta ympäristöön.

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS (EMC).....	2
2.1 Säännökset ja direktiivit.....	3
2.1.1 EMC-standardit	3
2.1.2 Sääntely Suomessa	5
3 SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT (EMI)	6
3.1 Häiriölähteet	6
3.2 Häiriöiden kytkeytymismekanismit	7
3.2.1 Säteilevä kytkeytyminen	8
3.2.2 Induktiivinen kytkeytyminen	9
3.2.3 Kapasitiivinen kytkeytyminen	10
3.2.4 Galvaaninen kytkeytyminen	12
4 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS PROSESSITEOLLISUUDESSA	14
4.1 Taajuusmuuttajakäyttöjä koskevat standardit ja käyttöympäristöt	14
4.2 Taajuusmuuttajakäytöt ja EMC	15
4.2.1 Umicoren tehtaalla	16
4.2.2 Säteilevät ja johtuvat häiriöpäästöt.....	18
4.2.3 Häiriöiden ehkäisy	19
4.2.4 Moottorikaapelointi	20
4.2.5 Suodattimet.....	20
4.3 Oikosulkumoottoreiden laakerivirrat	21
4.3.1 Kiertävät suuritaajuiset virrat ja akselin maadoitusvirrat.....	21
4.3.2 Kapasitiiviset purkausvirrat	22
4.3.3 Laakerivirtojen ehkäiseminen	23
4.4 Yliaallot	24
4.4.1 Yliaaltokomponentteja	24
4.4.2 Yliaaltojen haitat.....	25
4.4.3 Yliaaltojen ehkäisy ja suodatus prosessiteollisuudessa	26
5 EMC:N HALLINTA TEOLLISUUDEN SÄHKÖASENNUKSISSA.....	28
5.1 Suunnittelun näkökohtia	28
5.2 EMC-vaatimusten täytyminen sähköasennuksissa.....	29
5.2.1 Häiriönsuojaus standardeissa	29
5.2.2 Teollisuuden hankkeet ja laajennusprojektit	30
5.2.3 Käyttöönottotarkastus	31
5.2.4 Vaatimusten pysyvyys asennuksissa.....	31
5.3 TN-S.....	31
5.4 Potentiaalintasaus ja maadoitukset	32
5.4.1 Maadoitus- ja potentiaalintasausjärjestelmiä	33
5.4.2 Potentiaalintasaus EMC-suojauksessa.....	33
5.4.3 Toiminnallinen maadoitus.....	34
5.5 Taajuusmuuttajien asennus	36

5.5.1 Voimakaaelointi käytännössä	36
5.5.2 Oikosulkumoottorit	39
5.5.3 Yleisiä ohjeita Profinet-kaapelointiin.....	39
5.5.4 Yleisiä ohjeita ohjauskaapelointiin.....	40
5.6 Johtotiet ja kaapelointi	42
5.7 Huono esimerkki	43

6 YHTEENVETO	46
--------------------	----

LÄHTEET	47
---------------	----

KUVIOT

KUVIO 1. EMC-standardien jakautuminen eri ryhmiin.....	4
KUVIO 2. Häiriöiden kytketyymistapoja	8
KUVIO 3. Kahden piirin välinen induktiivinen kytketyyminen.....	10
KUVIO 4. Kahden johtimen välinen kapasitiivinen kytketyyminen	11
KUVIO 5. Laitteiden yhteiset impedanssit	13
KUVIO 6. Taajuusmuuttajan päävirtapiiri.....	15
KUVIO 7. Vaihtojännite PWM-tekniikalla	16
KUVIO 8. Vacon-100 MR4-runkokoon taajuusmuuttajan päävirtapiiri ja komponentit	18
KUVIO 9. Johtuvia harhavirtoja taajuusmuuttajakäytöissä.....	19
KUVIO 10. Kiertävät suurtaajuiset virrat, akselinmaadoitusvirrat ja muita ilmiöitä taajuusmuuttajakäytöissä.....	22
KUVIO 11. Kapasitiivisten laakerivirtojen siirtyminen ja staattorin, roottorin ja laakerin hajakapasitanssit	23
KUVIO 12. Havainnollistava kuva TN-S järjestelmän hyvistä puolista häiriönsuojauksessa	32
KUVIO 13. Periaate toiminnallisessa maadoituksessa	34

KUVAT

KUVA 1. Laajennusprojektin Vacon-100 kaappimallinen taajuusmuuttaja ja pienempiä MR4-runkokoon taajuusmuuttajia	16
KUVA 2. Uuden tuotanto-osaston estokelaparistot	27
KUVA 3. Sähkötilan FE-kisko ja FE-johtimen yhdistys IO-kaapin kiskoon	35
KUVA 4. NOMAK-kaapeleiden suojajohtimet IO-kaapin FE-kiskossa	35
KUVA 5. MCCMK-kaapelin 360-asteinen maadoitus seinään kiinnitettävässä ja kaappimallisessa taajuusmuuttajassa	37
KUVA 6. 360-asteinen maadoitus turvakytkimellä.....	38
KUVA 7. 360-asteinen maadoitus moottorin läpiviennissä.....	38
KUVA 8. Profinet-kaapelointia, jossa huomioitu 90-asteinen risteytyminen ja välimatkat.....	40
KUVA 9. Organisoitua kaapelityyppikohtaista kaapelointia kaapelihyllyillä	42
KUVA 10. Hyvää kaapeleiden erottelua.....	43
KUVA 11. Huonoa johdotusta keskuksella	44
KUVA 12. Toinen esimerkki huonosta johdotuksesta.....	44

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Perusilmiöitä, jotka aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä.....	7
TAULUKKO 2. Vaaditut sähkökäyttöluokat eri ympäristöissä verrattuna Vacon-100 luokitukseen....	17
TAULUKKO 3. Harmonisten yliaaltojen järjestyslukuja, taajuuksia ja komponentteja.....	25

1 JOHDANTO

Työnantajani ja opinnäytetyön tilaaja Umicore Finland Oy on maailmanluokan kobolttinjalostamo sekä akkumateriaalien ja kobolttituotteiden merkittävä eurooppalainen valmistaja. Kobolttinjalostamona se on kapasiteetiltaan suurin Kiinan ulkopuolisessa maailmassa. Tehtaan toiminta alkoi vuonna 1968 ja vuonna 2019 omistus siirtyi nykyiselle omistajalle Belgialaiselle Umicore-konsernille. Kokkolan tehdas työllistää tällä hetkellä noin 420 henkilöä. (Umicore.)

Opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä sähkömagneettiseen yhteensopivuuden prosessiteollisuuden näkökulmasta sekä luoda yleispätevä ohjeistus Umicore Finland Oy:lle sähkömagneettisen yhteensopivuuden hallintaan, jota voidaan pitää yleispätevänä EMC-ohjeistuksena prosessisähköistyksissä. Ohje perustuu olemassa oleviin sähkömagneettista yhteensopivuutta säänteleviin standardeihin ja säännöksiin, hyviin asennustapoihin sekä laitevalmistajien määräyksiin laitteiden oikeasta asennuksesta. Työn sisältämä teoretinen tieto etenkin taajuusmuuttajakäyttöihin liittyvistä ilmiöistä ja ongelmista on hyödyllistä yleistietoa varsinkin kyseisten järjestelmien kanssa työskenteleville.

Työssä syvennettiin sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen ja sen merkitykseen, sitä koskeviin direktiiveihin ja standardeihin, sähkömagneettisiin häiriöihin ja häiriöiden monimutkaisiin kytkeytymistapoihin sekä teoriaan näiden ilmiöiden taustalla. Esille tuodaan myös prosessiteollisuuden sähkökäytöissä tärkeässä osassa olevat taajuusmuuttajat ja oikosulkumoottorit, jotka toimivat säädettävyyden ja työn mahdollistajina muun muassa prosessiteollisuuden sekoittaja-, pumppu-, puhallin- ja kuljetinkäytöissä. Taajuusmuuttajakäyttöihin syvennytäänkin tässä työssä laajasti niiden ollessa laitteita, jotka ominaisuuksien ja toimintaperiaatteen takia voivat aiheuttaa etenkin väärin käytettyinä ongelmia sähkömagneettisen yhteensopivuuden näkökulmasta. Aiheena sähkömagneettinen yhteensopivuus on erittäin laaja, ja tämä opinnäytetyö rajattiinkin koskemaan ja käsittelemään pääosin teollisuuden 400-V:n sähköistystä ja siinä Umicorella merkittävässä osassa olevia laitteita.

Työn aineisto pohjautuu monipuolisiin alan verkkolähteisiin, aiheeseen liittyvään alan kirjallisuuteen, standardeihin ja taajuusmuuttajavalmistajien laiteoppaisiin. Työhön saatiin myös paljon omaa materiaalia, koska Umicoren tehtaalla on ollut kahden viime vuoden aikana lukuisia uusia merkittäviä laajenusprojekteja, joissa uusien prosessilaitteiden sähköistyksiä on ollut mahdollista tarkastella toteutusten puolesta juuri tätä työtä varten sähkömagneettisen yhteensopivuuden näkökulmasta.

2 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS (EMC)

EMC on lyhenne englanninkielisestä sanasta electromagnetic compatibility. Sähkölaitteiden tulee olla vaatimustenmukaisia häiriönsiedon ja häiriöpäästöjen suhteen. Aina kun sähkölaitteet ovat lähekkäin tai yhteydessä toisiinsa, ne vaikuttavat toisiinsa jollain tavalla. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden tarkoituksena on siis varmistaa sähköisten laitteiden ja laitteistojen kyky toimia ympäristössään niin, etteivät ne häiriinny tai itse häiritse samassa ympäristössä olevia laitteita tai järjestelmiä. (Tukes.) Asian voi siis yksinkertaisesti tiivistää siten, että yksittäisen laitteen tai laitteiston ollessa immuuni mahdollisille ulkoisille häiriöille ja niiden vaikutuksille eikä se itse häiritse ympäristöään toimimalla häiriönlähteenä, niin sitä voidaan pitää sähkömagneettisesti yhteensopivana.

Sähkömagneettisista häiriöistä aiheutuneet ongelmat, joita sähkömagneettisella yhteensopivuudella pyritään minimoimaan voivat vaarantaa henkilöturvallisuutta, ovat vaikeita paikannettavia ja niiden selvittäminen ja korjaaminen on kallista. Häiriöiden vaikutukset voivat myös hankaloittaa tai jopa estää muun muassa teollisuuden ja kiinteistöjen automaatiojärjestelmien, turvajärjestelmien ja antenniverkkojen toimintoja. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden vaatimusten täytyminen onkin tärkeä sähköturvallisuuslain vaatimus, ja sähköturvallisuusviranomaisen Tukes on joutunut jopa määräämään laitteiden käyttökieltoja EMC-vaatimukseen liittyvien puutteiden vuoksi. (Koivisto & Mäkinen 2020, 119.)

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden merkitys sähköistyvässä maailmassa on suuri, koska suurin osa sähköisistä laitteista vaikuttaa ympäristöönsä joillain tavoilla. Teknologinen kehitys, sähköistyminen ja toimintaympäristöjen monimutkaistuminen ovat vaatineet aiheen jatkuvaa tutkimusta ja kehitystä. Sähkömagneettista yhteensopivuutta säädelläänkin Euroopan alueella EU-direktiivillä ja Suomessa laeilla, jotka sisältävät EU-direktiivin määräykset. Lakien vaatimusten pohjalta on luotu standardeja, joita noudattamalla EMC-vaatimukset voidaan täyttää. (Mäkinen, Kallio, Tantarimäki 2009, 43.)

Prosessiteollisuudessa on aina vaarana toimintahäiriöiden syntyminen ja siksi on oltava tarkkana laitteiden ja komponenttien valinnassa sekä asennuksessa. EMC:n eli sähkömagneettisen yhteensopivuuden avulla pyritään saavuttamaan laitteiden ja järjestelmien ongelmaton toiminta monimutkaisissakin toimintaympäristöissä (Tukes).

2.1 Säännökset ja direktiivit

Sähkömagneettinen yhteensopivuus ei ole asia, jota suositellaan, vaan se on vaatimus, joka tulee täyttyä. Sähköisille laitteille on määrätty ympäristöstä riippuvaiset häiriötasot, jotta niiden toiminta olisi mahdollisimman ongelmaton. Sähkömagneettista yhteensopivuutta säännellään useilla laeilla sekä standardeilla, ja erilaisia sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyviä standardeja onkin erittäin suuri määrä, kuten myös eri komiteoita standardointiorganisaatioiden sisällä, jotka standardisoinnista ovat vastuussa. (SESKO.)

EU-direktiivissä eli Euroopan unionin lainsäädäntöohjeessa 2014/30/EU on esitetty sähkömagneettisen yhteensopivuuden vaatimukset sähkölaitteille. Kyseinen direktiivi velvoittaa lainsäädäntöohjeena Euroopan unionin maita sisällyttämään direktiivin määräykset omiin lakeihin. Vastuu siitä, että direktiivin määräykset toteutuvat täysimääräisinä, on laitteiden ja laitteistojen valmistajilla. Direktiivissä ei kuitenkaan ole määritelty vaatimuksia laitteiden EMC-ominaisuuksille yksityiskohtaisesti, vaan direktiivin vaatimustenmukaisuus voidaan osoittaa harmonisoituja eli yhdenmukaistettuja eurooppalaisia standardeja käyttämällä. (SESKO.) Yhdenmukaistetut standardit ovat tunnustetun eurooppalaisen standardointiorganisaation luomia standardeja ja sähkömagneettisen yhteensopivuuden tapauksessa tällainen organisaatio on CENELEC. Nämä standardit ovat luotu Euroopan komission pyynnöstä, ja niitä käyttämällä laitteiden ja laitteistojen valmistajat sekä mahdolliset muut toimijat voivat osoittaa, että tuotteet tai palvelut ovat lainsäädännön mukaisia. (Euroopan komissio.)

2.1.1 EMC-standardit

Varsinaisiksi EMC-standardeiksi luetaan standardit, jotka koskevat sähköisten laitteiden häiriöpäästöjä ja häiriönsietoa, vaikka muun muassa asennusympäristöön, asennuksiin ja ylipäätään häiriösuojaamiseen liittyvillä standardeilla on yhtymäkohtia EMC-standardeihin. EMC-perusstandardeissa on standardoitu tärkeimmät häiriömuodot ja niitä koskevat mittaus- ja testausmenetelmät. Perusstandardien lisäksi on olemassa yleisiä standardeja sekä tuoteryhmästandardeja, joissa testausvaatimukset on määritelty yksityiskohtaisesti eri laitteille. Yleiset standardit ovat kahta eri ympäristöluokitusta varten ja ne koskevat sen verran suurta laitekantaa, että ne eivät sisällä yksityiskohtaisia suorituskykyä ja toimintaa koskevia vaatimuksia. (Ylinen 2018, 14.) Kuviossa 1 on havainnollistettu näitä EMC-standardien eri tyyppisiä.

Tuoteryhmästandardit	Perusstandardit	Yleiset standardit
<ul style="list-style-type: none"> -GSM- ja DECT-laitteet -Televerkon laitteet -Kotitalouskojeet -Radio- ja TV-vastaanottimet -ISM-laitteet -Tietotekniikan laitteet 	<ul style="list-style-type: none"> -Magneettikentät -Jännitevaihtelut -RF-jännite -Syöksyaalto -Nopeat kytkentätransientit -RF-kenttä -ESD 	<ul style="list-style-type: none"> -Sieto teollisuudessa -Päästöt teollisuudessa -Sieto kotitalouksissa, kaupoissa ja kevyessä teollisuudessa -Päästöt kotitalouksissa,kaupoissa ja kevyessä teollisuudessa

KUVIO 1. EMC-standardien jakautuminen eri ryhmiin. (Mukaiillen Ylinen, T. 2018, 14.)

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden saavutettavuuden kannalta välttämättömät säännöt ja yleiset olosuhteet määritellään IEC:n kansainvälisissä standardeissa. Näissä standardeissa käsitellään sähkömagneettisten häiriöpäästöjen mittaamiseen käytettäviä menetelmiä, asetettavia päästörajoja häiriöpäästöille, testausmenetelmät ja tasot sietokyvyille häiriöitä vastaan sekä häiriöiden vaikutusten rajoittamiseksi suositeltavia tapoja. IEC:n tekninen komitea 77 käsittelee pääosin laitteiden sietokykyyn liittyviä asioita, ja CISPR-komitea on suuntautunut enemmän häiriöpäästöihin, vaikkakin yhteistyönä näiden komiteoiden välillä on tiivistä. IEC:n luomia standardeja käytetään laajasti eri maiden päättäjien toimesta sääntelyn perustana. Esimerkiksi aikaisemmassa kappaleessa mainittu EU-direktiivi 2014/30/EU pohjautuu niihin, koska eurooppalaisen standardointiorganisaatio CENELEC:n standardit ovat luotu IEC:n standardien pohjalta. (SESKO 2024.)

IEC ja eurooppalainen standardointiorganisaatio CENELEC tekevätkin tiivistä yhteistyötä keskenään. IEC:n ja CENELEC:n yhteistyön päällimmäisenä tarkoituksena on välttää päällekkäistä työtä ja lyhentää standardien laatimiseen kuluvaa aikaa. Tämän seurauksena uudet sähköalan standardointihankkeet suunnitellaan yhdessä IEC:n ja CENELEC:n kesken, ja mahdollisuuksien mukaan suurin osa niistä toteutetaan kansainvälisellä tasolla. Tähän mennessä jo noin 80 % CENELEC:n standardeista on identtisiä tai perustuu IEC:n standardeihin. (CENELEC.)

2.1.2 Sääntely Suomessa

Suomessa EU-direktiivin 2014/30/EU määräykset on sisällytetty sähköturvallisuuslakiin 1135/2016 sekä valtioneuvoston asetukseen sähkölaitteiden ja –laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta. Valtioneuvoston asetus on säädetty sähköturvallisuuslain nojalla. (Valtioneuvoston asetus 1436/2016.) Sähköturvallisuuslaissa on kerrottu sähkömagneettista yhteensopivuutta koskevat olennaiset vaatimukset sähkölaitteistoille, mutta valtioneuvoston asetuksessa niistä on säädetty tarkemmin (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016).

Edellä mainituissa säädöksissä on esitetty perusvaatimukset ja periaatteet, joilla määräysten vaatimukset on mahdollista täyttää standardeja noudattamalla. Tukes eli turvallisuus- ja kemikaalivirasto on listannut standardit, joita noudattaessa sähköturvallisuuslain vaatimukset ovat täytettävissä. Standardit on listattu Tukesin ohjeeseen nimeltä Sähkölaitteistojen turvallisuutta ja sähkötyöturvallisuutta koskevat standardit. Sähköasennusten kohdalla ei useinkaan päästä kansainvälisellä tasolla yhteneviin standardeihin johtuen erilaisista ilmastoista, luonnonoloista ja rakentamisen sekä asennusten kansallisista erityispiirteistä. Näissä tapauksissa vaatimustasoja on mahdollista yhtenäistää HD-harmonisointiasiakirjoilla ja eurooppalaisten EN-standardien kohdalla niihin liittyy kansallisia lisävaatimuksia. Suomen olosuhteet huomioivia sähköasennuksia käsitteleviä standardeja luo sähköteknisen alan standardointijärjestö SESKO eurooppalaisen vastineen CENELEC:n ja maailmanlaajuisen IEC:n standardien pohjalta. (Suomen standardit.) Tästä voidaan taas huomata, miten tiivistä yhteistyötä standardointiorganisaatiot tekevät keskenään. Yhteistyö helpottaa organisaatioiden työtä ja mahdollistaa standardien yhteneväisyyden.

Asian voi siis tiivistä niin, että Suomessa tehtävissä pienjännitesähköasennuksissa tulee noudattaa laitevalmistajien ohjeita ja SESKO:n laatimaa SFS6000 standardisarjaa, joka pohjautuu CENELEC:n ja IEC:n laatimiin standardeihin. Standardia noudattamalla tulee myös Sähköturvallisuuslain 1135/2016 ja valtioneuvoston asetuksen vaatimukset täytettyä. Laitevalmistajat noudattavat niitä koskevia laitekohtaisia tuotemallistandardeja, minkä myötä niiden markkinoilla olevat laitteet täyttävät EMC-vaatimukset. Tulee muistaa, että laitteiden käyttäjien ja asentajien tulee noudattaa valmistajien ohjeita laitteiden käytöstä ja asennuksesta, koska huonolla asennustavalla ja väärin käytettynä laitteiden EMC-ominaisuudet voidaan menettää.

3 SÄHKÖMAGNEETTISET HÄIRIÖT (EMI)

EMI on lyhenne englanninkielisestä sanasta electromagnetic interference. Sähkömagneettinen häiriö voidaan määritellä niin, että se on sähkömagneettista toimintaa, joka ei ole toivottua ja tarkoitettua ja se häiritsee jonkin sähköisen laitteen normaalia toimintaa. Se on siis laitteiden tai järjestelmien suunnittelijoiden tarkoittaman toiminnan vastaista. Suunnittelussa ongelmia on siinä, että vaikka sähkömagneettiset vuorovaikutukset tunnetaankin, sen mallintaminen kaikkiin mahdollisiin tilanteisiin ja toimintaympäristöihin on erittäin vaikeaa, ellei jopa mahdotonta. (Kettunen 1997, 33 [Chatterton & Houlden 1991].)

Häiriösignaalit ovat ei-toivottuja signaaleita, joita esiintyy lähes kaikissa sähköisissä laitteissa, mutta käsitteellä sähkömagneettinen häiriö tarkoitetaan sitä kokonaisuutta, joka koostuu häiriönlähteestä muodostuvasta häiriösignaalista ja häiriön kytkeytymisestä häiriön vastaanottajaan siten, että se vaikuttaa laitteen toimintaan. Sähkömagneettiseen häiriöön liittyy siis kolme tekijää, jotka ovat häiriön lähde, häiriön siirtyminen ja häiritetty laite. Sähkömagneettinen häiriö voidaankin teoriassa poistaa hoitamalla kuntoon edes yksi näistä häirinnän mahdollistajista. Häiriösignaaleja eli esimerkiksi sähkömagneettista säteilyä ei ole mahdollista kokonaan poistaa ja laitteet vaikuttavatkin ympäristöönsä aina jollain tavalla, mutta niitä voidaan ehkäistä ja vaimentaa. (Ott 2011, 5.)

Laitteiden valmistajia koskevat standardit häiriöpäästöistä ja häiriönsiedosta edesauttavatkin sähkömagneettisten häiriöiden syntymisen ehkäisyä, koska laitteet ovat standardien mukaisia ja niillä on tällöin hyvät sähkömagneettiset ominaisuudet. Lisäksi jos noudatetaan valmistajan ohjeita laitteiden oikeasta käytöstä ja asennuksesta sekä hyvää asennustapaa, niin ongelmilta pitäisi välttyä.

3.1 Häiriölähteet

Häiriölähteistä peräisin olevat häiriöt voivat levitä jopa toisiin kiinteistöihin säteilemällä tai johtumalla sähköverkkoa pitkin. Häiriölähteet luokitellaan yleensä luonnollisiin sekä teknisiin häiriöihin. Molemmissa ryhmissä häiriöt voidaan kuitenkin luokitella vielä tarkemmin alaryhmiin niiden ominaisuuksien perusteella. Luonnolliset häiriöt ovat nimensä mukaisesti luonnonilmiöistä peräisin olevia häiriöitä. Esimerkiksi salamaniskun myötä purkautuneista varauksista syntyneet virrat vaikuttavat ja muuttavat sähkökenttää, jolloin syntyy korkeataajuisia RF-häiriöitä. Tekniset häiriöt käsittävät kaikki teknisistä

järjestelmistä ja laitteista peräisin olevat häiriöt. (Kettunen 1997, 33–34 [Chatterton & Houlden 1991].) Todennäköisiä lähteitä mahdollisille sähkömagneettisille häiriöille teollisuusympäristössä on muun muassa induktiivisia kuormia kytkevät laitteet, sähkömoottorit, kuristimella varustetut loistevalaisimet, tasasuuntaajakäytöt, hakkurilaitteet, taajuusmuuttajat, muuntajat, sähkökeskukset sekä jakelukiskot. (SFS 600-1:2022, 148.) IEC:n teknisessä raportissa IEC/TR 61000-5-1 häiriölähteet on lueteltu ilmiökohtaisesti viiteen pääryhmään taulukon 1 mukaisesti.

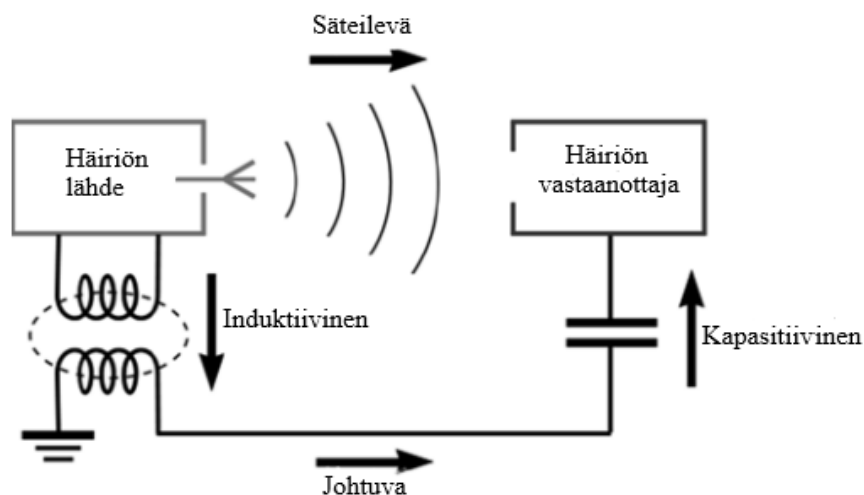
TAULUKKO 1. Perusilmiöitä, jotka aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä. (Mukaillen IEC/TR 61000-5-1, 2012, 11)

Pientaajuiset johtuvat ilmiöt	Pientaajuiset säteilevät ilmiöt	Suurtaajuiset johtuvat ilmiöt	Suurtaajuiset säteilevät ilmiöt	Sähköstaattiset purkaukset (ESD)
Harmoniset virrat ja jännitteet	Magneettikentät	Indusoituneet jatkuva-aaltoiset jännitteet ja virrat	Magneettikentät	Ilma
Jännitteen vaihtelu	Sähkökentät	Yksisuuntaiset muutosilmiöt	Sähkökentät	Kosketus
Jännitekuopat ja katkokset		Värähtelevät muutosilmiöt	Sähkömagneettiset jatkuva-aaltoiset kentät ja muutosilmiöt	Purkaukset
Jännite-epäsymmetria				
Jakelujännitteen taajuusvaihtelut				
Indusoituvat matalataajuiset jännitteet				
Tasasähkö vaihtosähköverkoissa				

3.2 Häiriöiden kytkeytymismekanismit

Tiedetään jo, että sähkömagneettisen häiriön ja sen mahdollisen vaikutuksen mahdollistaa häiriölähde ja sen vastaanottaja eli häiritty laite tai järjestelmä. Häiriöiden siirtymistä häiritsijästä häiriön vastaanottajaan voi kuitenkin tapahtua useilla erilaisilla mekanismeilla, joiden tunteminen on tärkeää, jotta voidaan paremmin vaikuttaa sähkömagneettisiin häiriöihin ehkäisevästi.

Nämä neljä kytkeytymistapaa on nimetty niiden takana olevan ilmiön mukaan, joka kytkeytymisen saa aikaan. Kytkeytymismekanismejä ovat säteilevä-, induktiivinen-, kapasitiivinen- ja galvaaninen kytkeytyminen (Sevgi 2017, 64.) (KUVIO 2).



KUVIO 2. Häiriöiden kytkeytymistapoja (Mukaiillen Sevgi 2017, 64)

3.2.1 Säteilevä kytkeytyminen

Sähkömagneettinen säteily on ainoa mahdollinen häiriöiden kytkeytymistapa, jossa ei vaadita fyysistä yhteyttä tai lähekkäisyyttä häiritsijän ja häiriön vastaanottajan kanssa. Häiritsijästä vapautuvat sähkömagneettiset aaltoliikkeet vapautuvat kaukokenttään ja aiheuttavat tällöin häiriövirtoja ja jännitteitä vastaanottavassa järjestelmässä. (Learn EMC 2011.)

Esimerkiksi sähköisissä laitteissa ja järjestelmissä niihin syötetty teho muuttuu lämpöhäviöiksi ja voi varastoitua erilaisiin sähköisiin kenttiin, silloin kun taajuudet ja täten myös muutosnopeudet ovat järjestelmässä pieniä. Syötetty teho voi alkaa poistumaan järjestelmästä säteilemällä, kun sen taajuuksia taas jossain vaiheessa kasvatetaan. Tällöin tapahtuu sähkö- ja magneettikentän vuorovaikutusta, jossa magneettikenttä muuttuu sähkökentän muutoksen vaikutuksesta ja magneettikentän muutos muuttaa samalla myös sähkökenttää. Häiriöt, jotka syntyvät sähkömagneettisista aalloista, ovat vaikeimpia sähkömagneettisen yhteensopivuuden haasteita ja niiden hallinta edellyttää kunnollista perehtymistä sähkömagneettiseen teoriaan. (Kettunen 1997, 36 [Chatterton & Houlden 1991].)

Sähkömagneettisen kentän ominaisuuksiin olennaisesti vaikuttavat säteilyn aiheuttaja eli säteilylähde, väliaine ja etäisyys tarkastelupisteen ja lähteen välillä. Elektronisissa laitteissa niiden johtimet toimivat antennina säteilyn lähetyksessä sekä vastaanotossa. Signaalit järjestelmien johtimissa on yleensä toimintaan liittyviä oleellisia hyötytaajuuksia, mutta myös ulkopuolelta tulevia häiriötaajuuksia voi esiintyä. Oleellisena käsitteenä antennivaikutuksessa voidaan taajuuden lisäksi pitää signaalin aallonpituutta. Antennivaikutuksen tehokkuus perustuu johtimen pituuteen suhteessa signaalin aallonpituuteen,

ja vaikutus on siksi tehokas sellaisilla taajuuksilla, joilla signaalin aallonpituuden neljäsosan monikerta vastaa johtimen pituutta. Hyvänä ja turvallisena johtimen pituutena antennivaikutuksen kannalta voidaan pitää pituutta, joka on 1/20 signaalin aallonpituudesta. (ABB TTT 2000-07, luku 6, 13–14.)

Sähkömagneettista säteilyä ja sen vaikutuksia voidaan ehkäistä ja vaimentaa pitämällä johtimet turvallisen pituisina, huolehtimalla tiiviistä koteloinnista ja Faradayn häkin toteutumisesta koko järjestelmässä. (Technical guide no.3 2012.) Enemmän Faradayn häkistä sähkömagneettisen säteilyn ehkäisyssä on kerrottu kappaleessa 4.2.3 taajuusmuuttajakäyttöjen häiriöiden ehkäisyssä.

3.2.2 Induktiivinen kytketyminen

Induktiivisessa kytketyksessä kytketyksen aiheuttaa magneettivuon muutoksessa syntynyt sähkömotorinen voima, joka johtavissa silmukoissa saa aikaan sähkövirran. Kaikki sähköiset järjestelmät sisältävät virtaa johtavia silmukoita ja kun virrat muuttuvat, ne vaikuttavat toisiinsa magneettikentän vaikutuksesta. (Kettunen 1997, 36 [Chatterton & Houlden 1991].) Induktiivinen kytketyminen ei vaadi häiritäjän ja häiriön vastaanottajan välistä kiinteää yhteyttä, koska kytketyminen tapahtuu magneettikentän välityksellä.

Häiritsevistä piiristä häiriön vastaanottavaan piiriin indusoituneen häiriöjännitteen suuruus on verrannollinen häiritsevän piirin virran taajuuteen, syntyneen magneettivuon tiheyteen ja silmukan pinta-alaan, joka on kohtisuoraan magneettivuota. Häiriöjännitteen suuruus voidaan tällöin ilmaista kaavalla (ABB TTT 2000-07, luku 6, 12.):

$$V_n = j2\pi f \times B \times A \times \cos(q) = j2\pi f \times M_{12} \times I_1 \quad (1)$$

V_n = häiriöjännite.

j = imaginaariyksikkö.

$2\pi f$ = kulmataajuus, jossa f on virran taajuus (Hz).

B = Magneettivuon tiheys (tesla, T).

A = Silmukan pinta-ala.

$\cos(q)$ = kosinifunktio, joka kuvaa kulmaa q magneettivuon ja silmukan välillä.

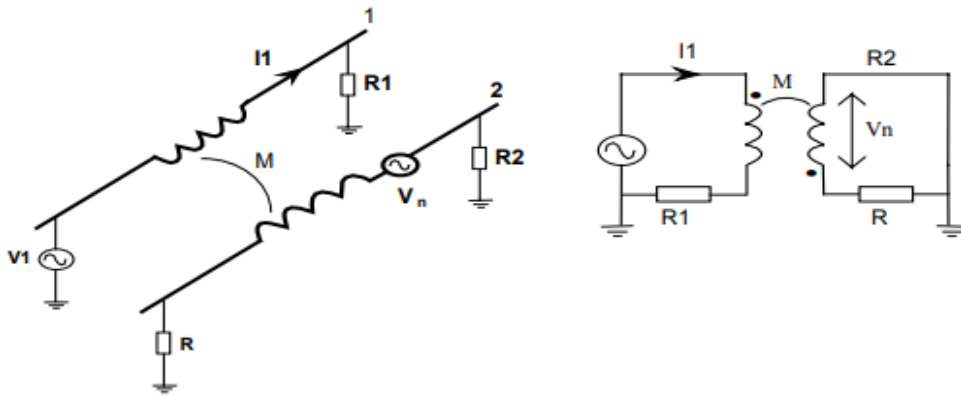
M_{12} = Keskinäisinduktanssi johtimien 1 ja 2 välillä (henry, H).

I_1 = Johtimessa 1 kulkeva virta (Ampeeria, A).

Johtimen 1 virta muodostaa johtimien välisen keskinäisinduktanssin kanssa magneettivuon häiriintyvän johtimen ympärille. Esimerkiksi keskinäisinduktanssin riippuvuus häiritsevän johtimen virtaan ja magneettivuohon voidaan esittää kaavalla:

$$M_{12} = \phi_{12} \div I_1 \quad (2)$$

Kuviossa 3 on esitetty kahden piirin välinen induktiivinen kytkeytyminen. Virta I_1 , joka kulkee johtimessa 1 synnyttää johtimien 1 ja 2 välillä esiintyvän keskinäisinduktanssin M_{12} kanssa magneettivuon ϕ_{12} johtimen 2 ympärille. (ABB TTT 2000-07, luku 6, 13.)



KUVIO 3. Kahden piirin välinen induktiivinen kytkeytyminen (ABB TTT 2000-07, luku 6, 13)

Induktiivista kytkeytymistä voidaan ehkäistä ja pienentää. Kun miettii juuri edellä mainittua induktiivisen kytkeytymisen selostusta ja mitä ilmiön takana tapahtuu, on muutama asia ainakin selvä. Välttämällä samansuuntaisia johdotuksia keskinäisinduktanssia ei synny, ja käyttämällä esimerkiksi kierrettyä parikaapelia, jonka parikierto antaa hyvän suojan induktiiviselta kytkeytymiseltä jännitteiden kumoutuessa niiden ollessa vastakkaisvaiheisia. On mahdollista myös kasvattaa johdinten välistä etäisyyttä, jolloin keskinäisinduktanssi johtimien välillä saadaan poistettua. (ABB TTT 2000-07, luku 6, 13)

3.2.3 Kapasitiivinen kytkeytyminen

Kapasitiivisessa kytkeytymisessä esimerkiksi kaksi lähekkäin olevaa kaapelia muodostavat keskenään kapasitanssin, ja tällöin häiriö siirtyy vastaanottajaan sähkökentän avulla. Laitteistoon tai sen osaan

muodostuu tällöin kondensaattorin toiminnan kaltainen kytkentä, jonka seurauksena virtasilmutukoiden sulkeutumisreitit poikkeavat normaalista. (Kettunen 1997, 36 [Chatterton & Houlden 1991].)

Kapasitiivinen kytkentyminen ei siis vaadi kiinteää yhteyttä häiritsevän ja häiriön vastaanottajan välillä, koska kyseessä on hajakapasitansseista muodostuva sähkökenttä.

Kapasitiivinen kytkentyminen vaatii suuret jännitetasot häiritsevässä piirissä ja korkeat impedanssit vastavastavassa eli häiriössä piirissä. Hajakapasitansseista muodostuneen sähkökentän vaikutuksesta häirittyyn piiriin kytkentynyt häiriöjännite on verrannollinen häiritsevän signaalin taajuuteen, häiritsevän piirin jännitetasoon, hajakapasitanssiin piirien välillä ja häiriötä vastaanottavan piirin impedanssiin. Häiriöjännitteen suuruus voidaan siis esittää kaavalla (ABB TTT 2000-07, luku 6, 12.):

$$V_n = j2\pi f \times V_1 \times C_{12} \times R \quad (3)$$

V_n = häiriöjännite.

j = imaginaariyksikkö.

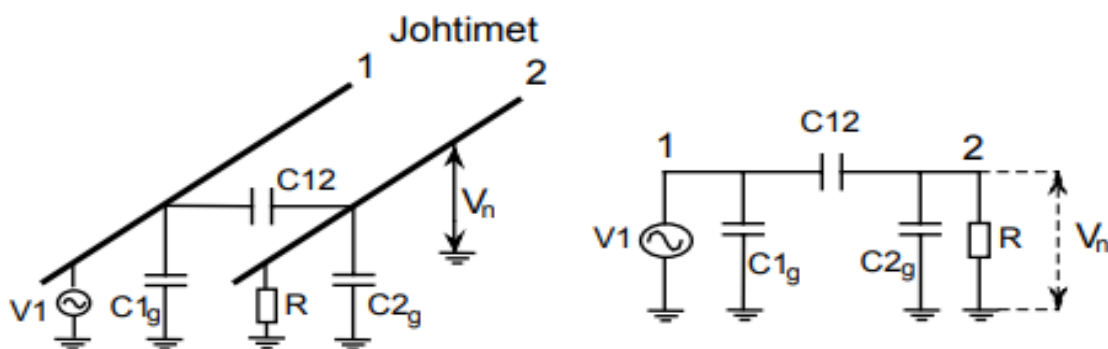
$2\pi f$ = kulmataajuus, jossa f on jännitteen taajuus (Hz).

V_1 = häiritsevän johtimen jännite.

C_{12} = johtimien 1 ja 2 välinen hajakapasitanssi (faradi, F).

R = häiriintyvän johtimen impedanssi (ohmi, Ω).

Kuviossa 4 on havainnollistettu kahden johtimen välinen kapasitiivinen kytkentyminen.



KUVIO 4. Kahden johtimen välinen kapasitiivinen kytkentyminen (ABB TTT 2000-07, luku 6, 12)

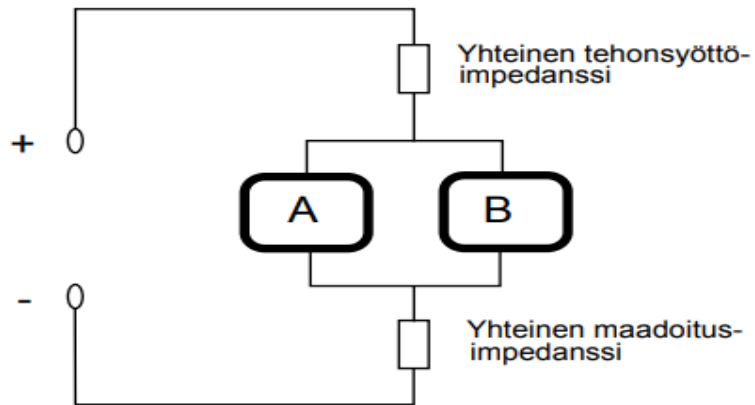
Kapasitiivisen kytkeytymisen ehkäisyyn ja vaimentamiseen voidaan myös sen toiminnan perusteella vaikuttaa. Merkittävä tekijä tässä kytkeytymistavassa on hajakapasitanssi, joka vaikuttaa häiriöjännitteeseen muiden kappaleessa aikaisemmin mainittujen tekijöiden ohella. Hajakapasitanssia voidaan pienentää ja ehkäistä välttämällä johdinten yhdensuuntaisuutta ja kasvattamalla niiden välistä etäisyyttä. (ABB TTT 2000-07, luku 6, 12.)

3.2.4 Galvaaninen kytkeytyminen

Galvaanisessa eli johtuvassa kytkeytymisessä häiriön aiheuttaja ja häiritävä kohde ovat fyysisesti yhteydessä toisiinsa, ja häiriö pääsee siirtymään johtumalla vastaanottajaan. Yleensä kyseessä on molempien yhteinen maadoitusjohdin, jonka kautta esimerkiksi toisessa järjestelmässä syntyvä häiriövirta pääsee kytkeytymään vastaanottavaan järjestelmään. (Lapp Automaatio.) Maadoituksiin liittyvät viat ja puutteet ovatkin yleensä sellaisia, että niitä ei välttämättä huomaa järjestelmän toimiessa normaalisti.

Yleinen ajatus on, että maadoituksen tarkoituksena on joidenkin osien yhdistäminen maapotentiaaliin. Sähkökenttiin vaikuttavat magneettikentät ja niiden muutokset aiheuttavat kuitenkin sen, että sähkökentän potentiaalia ei voida pitää niissä tapauksissa täsmällisenä käsitteenä. Toisin on tasavirtapiireissä, joissa ei ole vaikuttavia magneettikenttiä. Maadoittamista onkin järkevää ajatella niin, että sen tarkoituksena on järjestelmän virtasilmutkoiden hallittu sulkeutuminen. Korkeat taajuudet vaikeuttavat virtasilmutkoiden sulkeutumisen hallittavuutta, eli maadoituksen toimintaa. Lisäksi peruskäsitteet, jotka ovat piiriteoriassa olennaisia kuten resistanssi, induktanssi ja kapasitanssi, eivät ole enää taajuuksien kasvaessa niin yksiselitteisiä ja helposti tunnistettavissa. Korkeilla taajuuksilla jopa komponenttien välisille johdoille voidaan tunnistaa näiden piiriteorian peruskäsitteiden mukaisia ominaisuuksia. (Kettunen 1997, 33 [Chatterton & Houlden 1991].)

Kuviossa 5 on havainnoitu laitteiden yhteiset impedanssit, joiden välityksellä esimerkiksi toisen laitteen virranmuutokset voivat aiheuttaa häiriövirtaa toiseen laitteeseen. Laitteet A ja B ovat fyysisesti yhteydessä toisiinsa, ja niillä on yhteinen tehonsyöttö sekä maadoitus, jolloin häiriön on mahdollista päästä häiritsevästä laitteesta toiseen laitteeseen yhteisen impedanssin kautta. (ABB TTT 2000-07.)



KUVIO 5. Laitteiden yhteiset impedanssit (ABB TTT 2000-07)

Johtuvaa kytkeytymistä voidaan ehkäistä hyvällä maadoittamisella ja välttämällä yhteisiä maadoitus- ja tehonsyöttöjohtimia. Tällöin vältetään kahden laitteen fyysinen yhteys ja eliminoidaan samalla mahdollisuus johtuvaan kytkeytymiseen.

4 SÄHKÖMAGNEETTINEN YHTEENSOPIVUUS PROSESSITEOLLISUUDESSA

Tässä luvussa käsitellään prosessiteollisuudessa yleisesti käytettyjä ratkaisuja sähkömagneettisen yhteensopivuuden näkökulmasta ja siellä laajasti käytettyjä taajuusmuuttajia, oikosulkumoottoreita sekä niiden mahdollisia ongelmia ja niiden ehkäisyä. Luku painottuukin siis pääosin nopeussäädettyihin käyttöihin. Luku on myös teoriapainotteista johdantoa lukuun 5, jossa EMC-suojasta käsitellään enemmän käytännön osalta yleisellä tasolla.

4.1 Taajuusmuuttajakäyttöjä koskevat standardit ja käyttöympäristöt

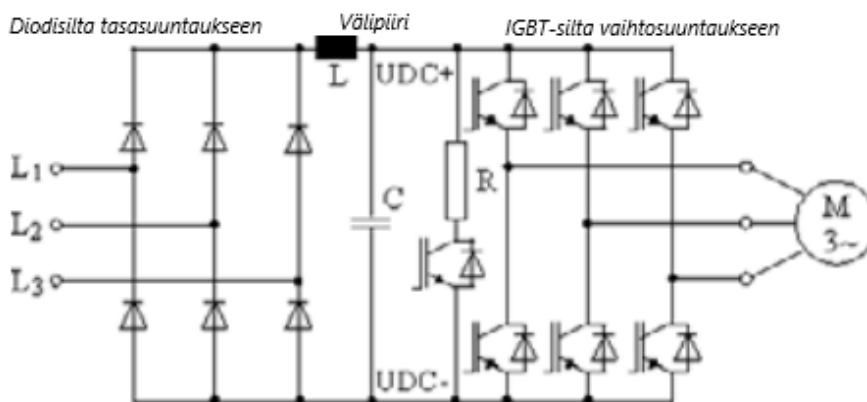
Tuotestandardi EN 61800-3 koskee taajuusmuuttajakäyttöjä, jotka sisältävät taajuusmuuttajan, moottorin ja niiden välisen kaapeloinnin. Siinä määritellään myös molemmat olennaiset sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen liittyvät asiat, eli millaisia häiriöpäästöjä laite saa synnyttää ja kuinka paljon, millaisia häiriöpäästöjä laitteen tulee sietää ja kuinka paljon sekä miten laite saa reagoida niihin. Häiriöpäästöt ja häiriönsieto ovat toisiinsa liittyviä, koska päästötason tulee olla merkittävästi alle sietotason. Tämä johtuu siitä, että yksittäisen laitteen sietotaso pysyy samana, vaikka verkossa olisi useita laitteita, mutta samalla päästöt kuitenkin kasvavat laitteiden lisääntyessä. (Björkman 2018, 190.)

Standardissa EN 61800-3 on myös määrätty rajat radiotaajuisille häiriöille päästöjen ja siedon osalta sekä se, että valmistajan velvollisuutena on dokumentoida keinot, joilla eri käyttöympäristöissä EMC-vaatimukset voidaan täyttää. Ympäristöt jaetaan kahteen käyttöympäristöön, joita ovat ensimmäinen ja toinen käyttöympäristö. Ilman muuntajaa yleiseen pienjänniteverkkoon kytkettävät asunnot sekä toimisto- ja kauppatilat kuuluvat ensimmäiseen käyttöympäristöön ja teollisuuslaitokset sekä muut tilat, joita syötetään omasta muuntajasta kuuluvat toiseen käyttöympäristöön. Häiriösuojausvaatimukset ovat ensimmäisessä käyttöympäristössä toista käyttöympäristöä tiukemmat ja täten toiseen käyttöympäristöön tarkoitettu laite ei sovellu välttämättä suoraan ensimmäiseen käyttöympäristöön. (D1 2022, 164.) Käyttöympäristöluokituksen lisäksi EMC-häiriöpäästöjen raja-arvojen mukaan on määritelty luokat C1, C2, C3 ja C4. Teollisuudessa yleensä ja etenkin Umicore Finland Oy:n kohdalla vähimmäisvaatimuksena on luokka C3, ja laitekanta koostuukin tehtaalla luokan C2 ja C3 laitteista. Sähkökäyttö kuuluu luokkaan C2, jos sen nimellisjännite on alle 1000 voltia, sähkökäyttö ei ole liikuteltava, ja sen asennuksen sekä käyttöönoton suorittaa ammattilainen. Sähkökäyttöluokan C3 määritelmänä on, että nimellisjännite on alle 1000 voltia ja esimerkiksi kyseinen taajuusmuuttaja on tarkoitettu käytettäväksi pelkästään toisessa käyttöympäristössä. (Technical Guide no.3 2012, 16.)

4.2 Taajuusmuuttajakäytöt ja EMC

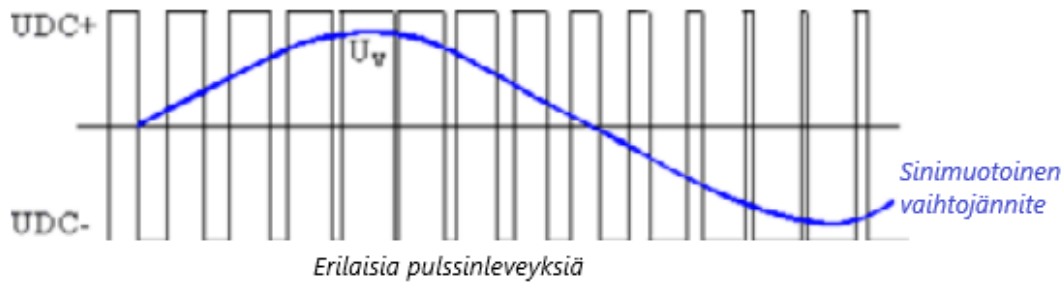
Taajuusmuuttajan toimintaperiaatteeseen perehtyminen ja sen toiminnan hahmottaminen auttaa ymmärtämään sen potentiaalinen häiriöiden mahdollistajana erilaisissa sovelluksissa ja ympäristöissä. Teollisuudessa yleisin taajuusmuuttajakäyttö on jännitevälipiirillisellä taajuusmuuttajalla ohjattu oikosulkumoottori. Taajuusmuuttaja mahdollistaa oikosulkumoottorin tarkan ja energiatehokkaan ohjauksen ja säädön. Oikosulkumoottoreita käytetään prosessiteollisuudessa muun muassa pumpuissa, sekoittajissa, puhaltimissa ja kuljettimissa luotettavina ja suhteellisen edullisina työn mahdollistajina.

Taajuusmuuttaja koostuu etenkin pienissä ja keskitehoisissa luokissa yleensä 6-pulssi diodisillasta, välipiiristä sekä eristyshilaisilla bipolaaritransistoreilla eli IGBT-transistoreilla toteutetusta vaihtosuuntaajasta, jolla tasajännitteestä saadaan muodostettua vaihtojännite (KUVIO 6). Diodisillalla tasasuunnattu jännite on keskiarvillisesti vakio, ja välipiiriin sijoitetulla kuristimella ja suodinkondensaattorilla saadaan tasajännitettä ja virran käyrämuotoa tasaisemmaksi. Välipiirissä sijaitseva vastushaara kuluttaa moottorin sähköisen jarrutuksen yhteydessä syntyneen energian, jos ominaisuus on moottorikäytössä otettu käyttöön. (Tuusa 2008.)



KUVIO 6. Taajuusmuuttajaan päävirtapiiri (Mukaiillen Tuusa 2008)

Vaihtosuuntaukseen käytetyssä IGBT-sillassa tavoitellun taajuuden ja jännitteen muodostamiseen hyödynnetään pulssileveysmodulointitekniikkaa (PWM), jossa kukin vaihtojännitelähtö kytketään IGBT-transistoreiden avulla suurta kytkentätaajuutta käyttäen vuorotellen tasajännitteisen välipiiriin positiiviselle ja negatiiviselle puolelle. Modulointi tarkoittaa IGBT-kytkimien keskinäisten johtamisaikojen muuttamista siten, että saavutetaan haluttu oikean suuruinen ja taajuinen vaihtojännite. Kuviossa 7 on esitetty PWM-tekniikka, jossa on erilaisia pulssinleveyksiä ja sinimuotoinen vaihtojännite. (Tuusa 2008.)



KUVIO 7. Vaihtojännite PWM-tekniikalla (Mukaiillen Tuusa 2008)

Taajuusmuuttajan vaihtojännitelähdön aaltomuodosta tavoitellaan siis lähes sinimuotoista ja se aikaansaadaan IGBT-transistoreiden mahdollistamalla erittäin nopeilla pulssimaisilla kytkentätapahtumilla, joiden kytkentätaajuus on yleensä useita kilohertsejä. Huonona puolena näissä tehoelektronikan nopeissa kytkentäilmiöissä on voimakas suuritaajuisen yliaaltojen muodostus. Yliaaltojen vuoksi taajuusmuuttajaa tulee ajatella voimakkaana häiriölähteenä ja siinä on aina huolehdittava häiriöiden riittävästä suojauksesta. Vaadituista häiriötasoista on olemassa vaatimukset standardeissa. (Eklund, Sulku 2018, 2.)

4.2.1 Umicoren tehtaalla

Umicorella nopeussäädetyissä käytöissä käytetään pääasiassa joko Vaconin tai ABB:n taajuusmuuttajia. Molemmilta merkeiltä on käytössä edelleen vanhemmilla osastoilla myös vanhempia malleja, mutta uusissa laajennusprojekteissa Vacon-100 on ollut pääosassa (KUVA 1). Kyseistä mallia käytetään myös paljon vanhemmilla osastoilla ja esimerkiksi taajuusmuuttajan rikkoutuessa kyseinen malli asennetaan pääsääntöisesti tilalle.



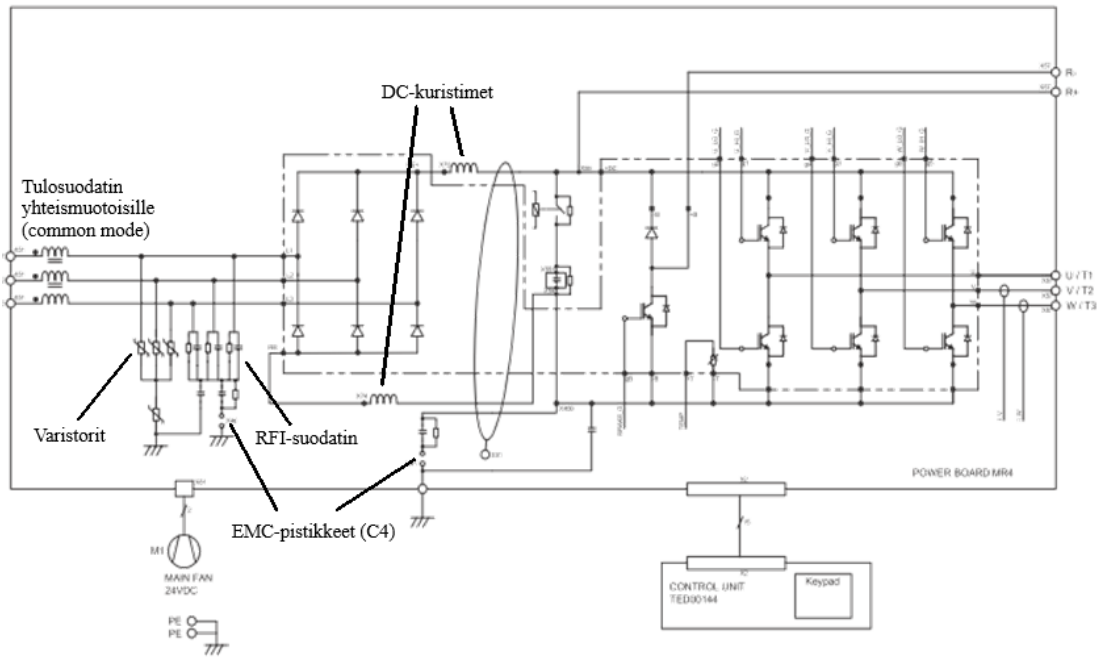
KUVA 1. Vacon-100 kaappimallinen taajuusmuuttaja ja pienempiä MR4-runkokoon taajuusmuuttajia.

Kuten aiemmin mainittiin, on Umicoren tehtaalla sähkökäyttöluokan vaatimus on vähintään C3. Seinään kiinnitettävien 208–240 V:n ja 380–500 V:n Vacon-100 taajuusmuuttajien luokka on C2, ja ne soveltuvat myös ensimmäiseen käyttöympäristöön vaatimusten puolesta. C2-luokan vaatimukset täyttyvät ilman mitään ulkoisia suodattimia. Kaappimalliset Vacon-100 tuoteperheen taajuusmuuttajat ovat luokaltaan C3 (Vacon-100 selection guide 2019, 23). Taulukossa 2 on esitetty eri ympäristöihin vaaditut luokat verrattuna Vaconin luokkaan, ja taulukon perusteella taajuusmuuttajamalli soveltuisi jopa ensimmäiseen käyttöympäristöön ja herkkiin ympäristöihin.

TAULUKKO 2. Vaaditut sähkökäyttöluokat eri ympäristöissä verrattuna Vacon-100 luokitukseen. (Mukaillen Vacon-100 koulutusmateriaali 2016)

	Vaadittu	Vacon
Herkät ympäristöt	C2	C2
Asuinympäristöt	C2	C2
Kaupalliset ympäristöt	C2	C2
Kevyt teollisuus (oma jakelumuuntaja)	C3	C2
Kevyt teollisuus (julkinen pienjänniteverkko)	C2	C2
Raskas teollisuus (oma jakelumuuntaja)	C3	C2
Raskas teollisuus (IT-verkko)	C4(T)	C4(T)

Perehtymällä taajuusmuuttajan sisäiseen rakenteeseen ja komponentteihin sen sisällä, voidaan huomata tekijöitä, joiden avulla sen EMC-ominaisuuksia on saatu paremmaksi (KUVIO 8). Vacon-100 industrial mallissa on valmiiksi sisääntulossa suodatin yhteismuotoisten komponenttien suodattamiseksi ja varistorit ylijännitteiden sekä transienttien vaimentamiseksi. Ennen tasasuuntaajaa sekä välipiirissä on RFI-suodatin, joka suodattaa korkeataajuisia häiriöitä maahan. DC-kuristimet auttavat tasoitamaan tasasuuntaajan jälkeen muun muassa harmonisia virtoja, jolloin vaihtosuuntaajalle saadaan syötettyä paremman laatuista tasajännitettä. Kaikki nämä vaikuttavat myös parantavasti taajuusmuuttajan vaihtosuuntaajan syöttämän jännitteen ja virran laatuun. Jos tarvitaan vielä parempaa suodatusta taajuusmuuttajan syöttämälle jännitteelle, niin silloin ulkoisia suodattimia tulee harkita. EMC-pistikkeet ovat valmiiksi paikallaan, mutta IT-verkoissa ne tulee ottaa pois, jolloin RFI-suodattimen ja maan välinen yhteys poistuu, ja taajuusmuuttajasta saadaan C4-luokan laite (Vacon-100 asennusopas, 105).



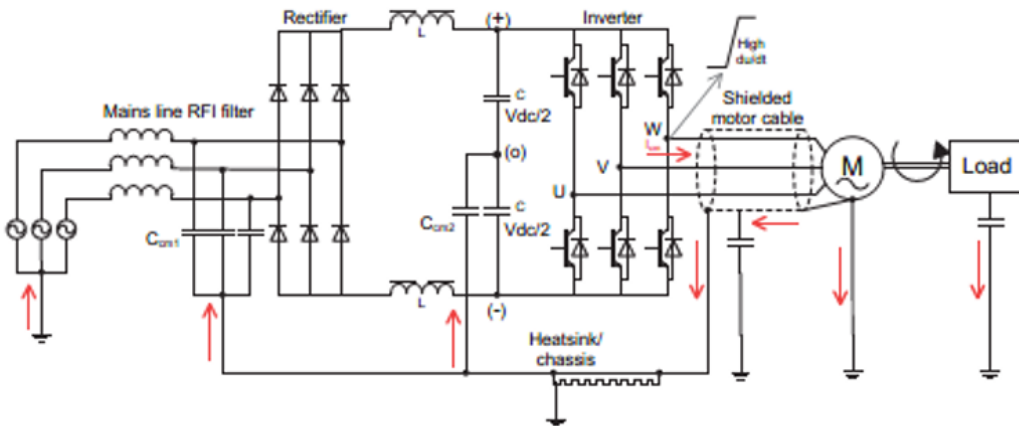
KUVIO 8. Vacon-100 MR4-runkokoon taajuusmuuttajan päävirtapiiri ja komponentit. (Danfoss asiantuntija, yksityinen sähköposti 2025)

4.2.2 Säteilevät ja johtuvat häiriöpäästöt

Taajuusmuuttajan vaihtojännitteinen moottorilähtö, joka on muodostettu puolijohdekytkimillä ja yleensä käytetyillä nopeilla IGBT-transistoreilla voi aiheuttaa suuria jännitteen muutos- ja nousunopeuksia sekä yliaaltoja. Nopeat jännitepulsit voivat muodostaa ylijännitteitä varsinkin, jos ne summautuvat moottorikaapelissa. Taajuusmuuttajakäytöistä peräisin olevat häiriöt voidaan jakaa säteileviin tai johtuviin. Johtuvilla häiriöillä taajuusalue ulottuu yleisesti noin 30 MHz:iin ja säteilevät häiriöt tyypillisesti alkavat siitä. Molemmilla häiriötyypeillä vaikutusmekanismit myös poikkeavat jonkin verran toisistaan, ja esimerkiksi johtuvien häiriöiden tapauksessa niiden vaikutusalue ulottuu pääosin samassa syöttöverkossa oleviin laitteisiin, ja säteilevien häiriöiden vaikutusalueella ovat kaikki läheiset laitteet. Tämän vuoksi myös niiden ehkäiseminen ja vaimentaminen eroavat toisistaan jonkin verran. (Björkman 2018, 191.)

Taajuusmuuttajista peräisin olevat johtuvat häiriöt saattavat päästä muihin laitteisiin kaikkien johtavien osien kautta, ja kyseessä on yleensä maadoitus, kaapeli tai laitteen oma metallirunko. (ABB technical guide no.3 2012, 19.) Yhteismuotoiset häiriöt voivat kytkeytyä muun muassa moottorin käämeissä esiintyvien kapasitanssien kautta moottorin runkoon ja palata takaisin moottorikaapelin vaippaa pitkin taajuusmuuttajalle. Osa häiriövirrasta voi päästä rakennuksessa oleviin johtaviin osiin harhavirtana,

jolloin häiriöt voivat levitä ympäristöön esimerkiksi säteilemällä tai kytkeytymällä induktiivisesti. (Ylinen 2018, 60.) Korkeiden muutosnopeuksien myötä voi moottorille menevässä jännitteessä esiintyä korkeita taajuuksia ja jopa yli 1000 V:n amplitudeja, jolloin järjestelmästä ulos päässeet häiriövirrat voivat kulkeutua johtaviin osiin useaa eri reittiä (KUVIO 9).



KUVIO 9. Johtuvia harhavirtoja taajuusmuuttajakäytössä (Facts worth knowing about AC drives 2019, 135)

4.2.3 Häiriöiden ehkäisy

Johtuvia häiriöpäästöjä voidaan taajuusmuuttaja käytöissä estää ja vähentää muun muassa korkeataajuisien häiriöiden RFI-suodattimella, ferriittirenkaiden käytöllä liitännäpisteissä sekä kuristimen ja du/dt suodattimen käytöllä (ABB technical guide no.3 2012, 20). Laitteen sisäinen EMC-suodatin mahdollistaa mahdollisille häiriöille lyhyen reitin maahan, ja paras hyöty laitteen suodattimesta saadaan silloin, kun moottorikaapelin suojavaippa liitetään taajuusmuuttajan runkoon kiinni. Tällöin tulee kuitenkin muistaa vaipan maadoitus myös moottorilla. Suositeltavaa on myös tehdä omat erilliset maapiirit tehoelektronikan laitteille sekä ohjaus- ja mittauselektronikalle. Ne voidaan sitten yhdistää erikseen varsinaiseen maahan ja tällöin saavutetaan se, etteivät maapiirien virrat pääse vaikuttamaan toisten piirien laitteisiin. (Björkman 2018, 192.)

Säteilevien häiriöpäästöjen estämiseen tehokas tapa taajuusmuuttajakäytöissä on Faradayn häkin muodostaminen. Faradayn häkki saavutetaan tiiviillä laitteen rungolla, suojavailla kaapeleilla käyttäen 360-asteista maadoitusta läpivienneissä ja moottorin tiiviillä kotelolla. Näiden kaikkien tulee olla yhtenäisesti liitettyjä toisiinsa koko taajuusmuuttajakäytön matkalta sähkötilasta oikosulkumoottorille. (ABB technical guide no.3 2012, 20.) Kyseinen asennustapa on tuotu esille taajuusmuuttajavalmistajien ohjeissa ja luvun 5 kappaleessa 5.5, joka käsittelee taajuusmuuttajien asennuksia.

ST kortissa 715.00 taajuusmuuttajan häiriönsuojauksesta on mainittu lyhyesti ja yksinkertaisesti ilmaistuna, että häiriöiden syntymistä ja niiden vaikutuksia voidaan ehkäistä ja pienentää suodattamalla muuttajan lähtö sekä käyttämällä suojattuja kaapeleita ja komponentteja yhdistettynä hyvään asennustapaan. Taajuusmuuttajavalmistajien ohjeita noudattamalla saavutetaan vaadittu suojaus. (Eklund, Sulku 2018, 5.)

4.2.4 Moottorikaapelointi

Taajuusmuuttajan ja moottorin välinen kaapelointi on tärkeässä osassa EMC-suojauksessa, koska moottorikaapelissa kulkeva virta voi sisältää runsaastikin häiriöitä. Moottorikaapelina tulisi käyttää parhaimman suojauksen saavuttamiseksi kaksoisvaippaista kaapelia, kuten MCCMK, jossa vaippoina ovat kuparista muodostettu palmikko ja kuparifolio. Kyseinen rakenne antaa hyvät suojausominaisuudet. Suojausominaisuus perustuu tässä tapauksessa reduktioilmioon, jossa nipussa olevat vaihejohtimet ja kaapelin vaippa muodostavat muuntajan kaltaisen ilmiön. Sen myötä esimerkiksi vaihejohtimissa kulkeva mahdollinen yhteismuotoinen häiriövirta pyrkii luomaan induktiolain mukaisesti vaippaan vastakkaissuuntaan kulkevan virran, jonka vaikutuksesta palaava virta kulkee kaapelin vaipassa, ja harhavirrat jäävät pieniksi. (Ylinen 2018, 60.) Oikeanlaisen kaapelityypin käyttämisen lisäksi moottorikaapeloinnissa on huomioitava jo aikaisemmin mainittu 360-asteinen maadoittaminen, koska muuten oikeanlaisen moottorikaapelin häiriönsuojausominaisuuksista ei ole juurikaan hyötyä.

4.2.5 Suodattimet

Taajuusmuuttajakäytöissä on myös mahdollista käyttää ulkoisia lisäsuodattimia. Teollisuusympäristössä lisäsuodattimien käyttö ei ole kovin yleistä, mutta mahdollisuus on hyvä pitää mielessä. Taajuusmuuttajan suuret kytkentänopeudet yhdistettynä moottorikaapelin vaikutukseen voivat muodostaa ylijännitteitä moottorille etenkin pitkillä moottorikaapeleilla. Moottorikaapelissa jännitepulssit voivat summutua ja niistä syntyneet ylijännitteet voivat vaurioittaa moottoria. Du/dt suodattimet suodattavat juuri näitä nopeita jännitepulsseja. Suodatin asennetaan taajuusmuuttajan ja moottorin väliin, mutta yleensä 400 V:n pääjännitteellä kyseiset suodattimet eivät ole tarpeellisia, koska oikosulkumoottorit kestävät todellisuudessa yli 1000 V:n jännitteitä. (Vacon-100 Du/Dt filter technical guide, 4.)

Sinisuodattimia voidaan käyttää, jos halutaan suodattaa moottorille menevästä jännitteestä kaikki ylimääräiset jänniterasitteet niiden suodattaessa jännitteestä kaikki korkeataajuiset komponentit. (Vacon filter manual, 10) Lisäksi on olemassa ennen taajuusmuuttajaa ja taajuusmuuttajaan kiinni asennettavia RFI-suodattimia, joilla korkeataajuiset häiriöt saadaan johdettua maahan. Monet taajuusmuuttajat sisältävät tällaisen kuitenkin sisäisesti, kuten jo käsitelty Vacon-100 taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajien ominaisuudet vaihtelevat ja laitteiden dokumenteista löytyy tiedot niiden ominaisuuksista.

4.3 Oikosulkumoottoreiden laakerivirrat

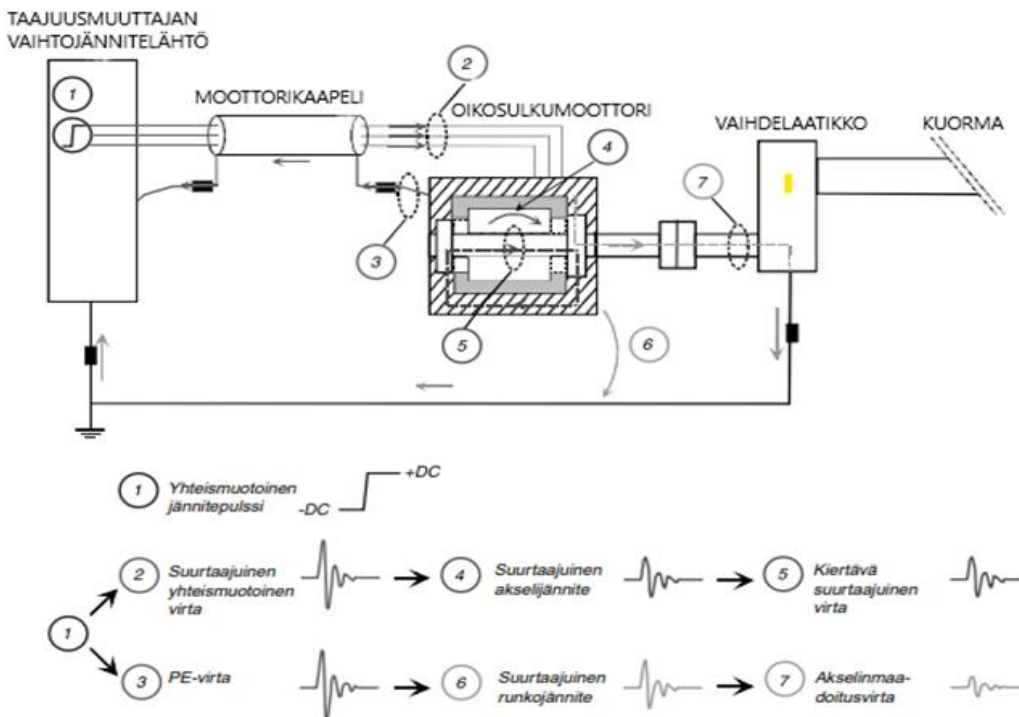
Laakerivirran synnyttää jännite, joka indusoituu laakerin yli. Taajuusmuuttajakäytöissä taajuusmuuttajan IGBT-transistoreiden suuret kytkentätaajuudet, ja niistä muodostuvat ilmiöt, kuten suuritaajuiset jännite- ja virtapulssit voivat vaurioittaa ohjattavaa moottoria. Nykyisissä moottoreissa pientaajuisia laakerivirtoja ei juuri esiinny niiden suunnittelu- ja valmistustapojen ansiosta. Jännitteitä, jotka aiheuttavat suuritaajuisia laakerivirtoja voi syntyä laakereiden kautta kiertävistä suuritaajuisista virroista, kapasitiivisista purkausvirroista ja akselin kautta kulkevista maadoitusvirroista. Laakerivirrat voivat pahimmillaan lyhentää moottorin käyttöikää huomattavasti niiden aiheuttamien laakerivaurioiden takia. (ABB. Understanding and mitigating bearing currents.)

4.3.1 Kiertävät suuritaajuiset virrat ja akselin maadoitusvirrat

Kiertävissä virroissa suurten moottoreiden suuritaajuinen magneettivuoto, joka kiertää staattoria, indusoi jännitteen moottorin akselin päiden välille. Vuo syntyy staattorin käämityksestä staattorin runkoon kulkeutuvien kapasitiivisten vuotovirtojen epäsymmetrian seurauksena, ja jännitteen ollessa riittävän suuri virta alkaa kiertämään akselin ja laakereiden kautta. Tällöin tapahtuu muuntajan kaltainen ilmiö, jossa yhteismuotoinen virta staattorin rungossa toimii ensiöpuolena, josta indusoituu kiertävä virta roottoriin eli toisiopuolelle (KUVIO 10). (ABB technical guide no.5 2011, 9.) Tämä ongelma koskee suurempia moottoreita, jotka ovat pääsääntöisesti yli 110 kW:n nimellistehoisia. Valmistajat antavat suosituksia erilaisiin tilanteisiin ja yleensä yli 100 kW:n teholuokissa suositellaan käytettäväksi jo eristettyjä laakereita. (Vacon engineered drives manual.) Tässä laakerivirta ilmiöissä tapahtuu siis jo aiemmin luvussa 3 käsiteltyä induktiivista kytkeytymistä, kun virta indusoituu staattorilta roottorille.

Akselin kautta kulkevissa maadoitusvirroissa on kyse siitä, että staattorin runkoon vuotavien virtojen on päästävä takaisin lähteeseen, eli taajuusmuuttajaan. Impedanssia esiintyy kaikissa paluureiteissä ja

täten lähdeeseen verrattuna moottorin rungon jännite kasvaa. Moottorin akselin ollessa maadoitettu esimerkiksi vaihdelaatikon tai pumpun kautta voi jännitteen suuri kasvu moottorin rungossa aiheuttaa virran vuotamisen laakereiden kautta akseliin ja siihen liitettyyn vaihdelaatikkoon tai käytettävään kuormaan. Tällöin laakeri, akseli ja laitteen runko muodostaa piirin paluuvirralle, joka pyrkii näiden kautta takaisin taajuusmuuttajaan (KUVIO 10). (ABB technical guide no.5 2011, 9.)

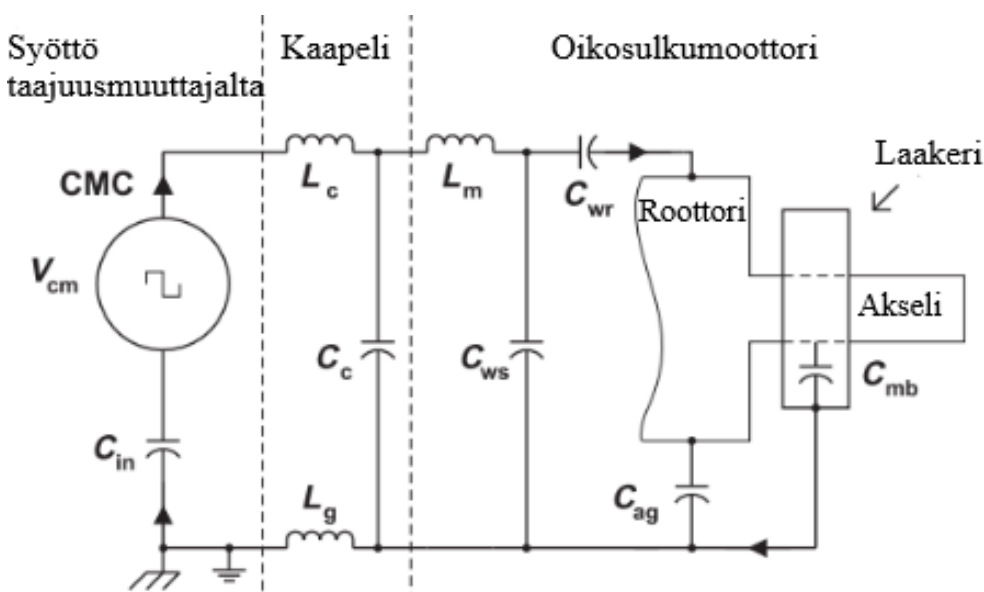


KUVIO 10. Kiertävät suurtaajuiset virrat, akselinmaadoitusvirrat ja muita ilmiöitä taajuusmuuttajakäytössä (Mukaillen ABB technical guide no.5 2011, 13)

4.3.2 Kapasitiiviset purkausvirrat

ABB:n asiakastapauksia käsittelevä artikkeli laakerivirroista ja niiden poistamisesta esittää kapasitiivisten purkausvirtojen olleen pääosin ongelmana nimellistehoaltaan alle 55 kW:n moottoreissa, eli kyseistä ilmiötä voidaan siis pitää pienempien moottoreiden ongelmana, vaikka se ei silti kovin yleinen olekaan. (Bearing currents and how to beat them.) Näissä pienemmissä moottoreissa jännitejakauma moottorin sisäisissä hajakapasitansseissa voi mahdollisesti aiheuttaa niin suuria jännitteitä moottorin akselissa, että ne muodostavat suuritaajuisia virtapulsseja laakereihin. Tämä on mahdollista, vaikka moottorin runko olisikin maadoitettu, jos moottorin akselilla ei ole käytettävän laitteen kautta maadoi-

tusta. Kapasitansseja esiintyy esimerkiksi staattorikäämitysten ja roottorin välillä, jolloin yhteys staattorin käämityksistä roottorin metalliosiin on mahdollinen. Kapasitanssit ovat moottorin sisällä hyvin pieniä, joka tarkoittaa suurta impedanssia pienillä taajuuksilla. Taajuusmuuttajakäytöissä nopeat pulssit omaavat kuitenkin suuria taajuuksia, jolloin pienetkin kapasitanssit mahdollistavat virralle impedanssiltaan pienen reitin kulkeutumiseen. (ABB technical guide no.5 2011, 13.) Tämän ilmiön taustalla on siis myös jo aiemmin luvussa häiriöiden kytkeytymismekanismit käsiteltyä kapasitiivista kytkeytymistä. Nopeat muutokset taajuusmuuttajan syöttämässä yhteismuotoisissa virroissa voi synnyttää kapasitiivisesti kytkeytyviä virtoja näiden moottorin osien välillä (KUVIO 11).



KUVIO 11. Kapasitiivisten laakerivirtojen siirtyminen ja staattorin, roottorin ja laakerin hajakapasitanssit (Mukaillen ABB technical guide no.5 2011, 15)

4.3.3 Laakerivirtojen ehkäiseminen

Suurtaajuisiin laakerivirtoihin on mahdollista vaikuttaa ja peruseriaatteet ovat samankaltaisia kuin muidenkin EMC-ilmiöiden kanssa. Kuten muissakin EMC-ongelmissa, niin myös laakerivirtoihin pätee hyvä maadoitus ja sen tärkeys. ABB:n teknisessä oppaassa nro.5 mainitaan symmetristen moottori-kaapeleiden käyttäminen, kaapeleiden vaipan 360-asteinen maadoitus koko taajuusmuuttajakäytössä sekä mahdollinen potentiaalintasaus oikosulkumoottorilla ja käytetyllä laitteella. Laakerivirtojen aiheuttajien eli yhteismuotoisen jännitteen ja virran vähentäminen sellaiselle tasolle, etteivät ne vaikuta laakereihin, on mahdollista saavuttaa esimerkiksi yhteismuotoisten komponenttien suodattamisella.

Lisäksi on mahdollista käyttää eristettyjä laakereita, jolla laakerivirtapiiri saadaan katkaistua. ABB:n dokumentissa laakerivirrat ja niiden välttäminen vuodelta 2018 on mainittu samoja keinoja kuin teknisessä oppaassa nro.5, mutta lisänä siinä on kerrottu akselinmaadoitusharjan käytöstä moottorissa.

4.4 Yliaallot

Prosessiteollisuudessa yliaalloja voivat aiheuttaa taajuusmuuttajien lisäksi muun muassa generaattorit, moottorit, muuntajat, tasasuuntaajat ja UPS-laitteet. Suurimpina aiheuttajina voidaan kuitenkin pitää juuri suuntaajakäyttöjä. Yliaallot syntyvät säröytyneistä jännitteistä ja virroista verkossa ja resonanssi-ilmiöt usein vahvistavat ja suurentavat verkon yliaalloja. Säröytyminen tarkoittaa jännitteen tai virran muodon poikkeamista sinimuodosta, ja verkkojännitteen säröytyminen aiheutuukin pääosin epälineaaristen kuormien ottamista tai verkkoon syöttämistä virroista. Jännite säröytyy silloin, kun normaalitajuisesta sinimuodosta poikkeavat virrat aiheuttavat jännitehäviöitä verkon impedansseissa. Säröytynyt jännite taas aiheuttaa normaalista sinimuodosta poikkeavia virtoja, vaikka kuormitus olisikin lineaarinen. (Yliaallot ja kompensointi 2018, 26.) Yliaallot aiheuttavat magneettikenttien voimistumista sähköisissä laitteissa, järjestelmissä, sähkötiloissa ja kaapeleissa. Magneettikenttien voimistuminen altistaa sähkömagneettisille häiriöille, ja toimintaan vaikuttavat häiriöt esimerkiksi automaatio- ja datajärjestelmissä, suojalaitteissa sekä mittareissa ovat mahdollisia. (Mäkinen, Kallio, Tantarimäki 2009, 47.)

4.4.1 Yliaaltokomponentteja

Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden monikertoja, ja ne voidaan jakaa eri komponentteihin niiden ominaisuuksien mukaan (TAULUKKO 3). Komponenttiluokista tiedetään yliaallon vaiheen pyörimissuunta perusaaltoon verrattuna. Komponentteja ovat positiiviset-, negatiiviset-, ja nollakomponentit. (Yliaalto-opus 2008). Eri komponenteilla on erilaisia vaikutuksia ja yleisesti positiiviset komponentit aiheuttavat lisälämpenemistä ja negatiiviset puolestaan lisähäviöitä. Nämä vaikutukset voivat kohdistua juuri esimerkiksi oikosulkumoottoriin sen syöttöjännitteen ollessa yliaaltopitoista. (Yliaallot ja kompensointi 2018, 35.)

TAULUKKO 3. Harmonisten yliaaltojen järjestyslukuja, taajuuksia ja komponentteja (Mukaillen Yliaalto-opus 2008)

Järjestysnumero	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Komponentti	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Yliaallon järjestysluvun ollessa 4,7,10,13 ja siitä eteenpäin, on vaihekulma sama perusaallon kanssa, joka tarkoittaa, että yliaallot ja magneettikenttä pyörivät samaan suuntaan perusaallon kanssa. Järjestysluvut 2,5,8,11 ja siitä eteenpäin tarkoittavat, että vaihekulma on eri perusaaltoon nähden, jonka vuoksi yliaallot ja magneettikenttä pyörivät tällöin eri suuntaan perustaajuuteen verrattuna. Järjestysluvun ollessa 3,6,9,12 ja siitä eteenpäin vaihekulma on kaikilla vaiheilla sama, eli tällöin yliaallot eivät pyöri. Yliaallot voidaan lisäksi jakaa parillisiin ja parittomiin. Normaalisessa tilanteessa käyrämuodon ollessa symmetrinen, ovat syntyvät yliaallot parittomia. Parilliset yliaallot ja etenkin niiden suuri määrä viittaa yleensä vikaan tai epätavalliseen käyttötilanteeseen. (Yliaalto-opus 2008.)

4.4.2 Yliaaltojen haitat

Yliaallot aiheuttavat häviöiden kasvamista itse sähköverkossa sekä käyttäjän omissa laitteissa ja vaikuttavat laitteiden kuormitettavuuteen alentavasti, jolloin mahdollinen laitteita vahingoittava ylikuormittuminen tapahtuu herkemmin. Esimerkiksi oikosulkumoottorit voivat ylikuormittua yliaaltojen aiheuttamista magneettikentistä. Yliaallot voivat myös aiheuttaa ongelmia automaatiolaitteisiin, suojarleisiin ja mittareihin. Yleensä syntyneiden EMC-häiriöiden syynä ovat käyttäjän omat laitteet ja niiden aiheuttamat yliaallot ja muut ilmiöt. (Yliaallot ja kompensointi 2018, s 30.)

Kolmas yliaalto voi olla haitallinen, koska se aiheuttaa virtojen summautumisen nollajohtimeen. Normaalisti kolmivaihejärjestelmässä nollajohdin ei kuormitu ollenkaan symmetrisellä kuormituksella, ja epäsymmetrisellä kuormituksella nollajohdin kuormittuu enintään sen verran, mitä eniten kuormittuva vaihejohdin. Standardit määräävät nollajohtimen paksuudeksi eli poikkipinnaksi puolet vaihejohtimen poikkipinnasta silloin kun johtimen poikkipinta on kuparijohtimella yli 16 tai alumiinijohtimella 25 neliömillimetriä. Harmoniset yliaallot, jotka ovat kolmella jaottomia kuormittavat nollajohdinta saman verran kuin virran perusaalto. Kolmella jaollisten yliaaltojen tapauksessa nollajohtimen virta voi olla vaihevirtoja suurempi, koska virrat summautuvat nollajohtimeen. Teollisuudessa paljon käytettyihin UPS-laitteisiin tulisivin kaapeli mitoittaa yleisten johdon mitoituskerroimien lisäksi 1,25-kertaisen

kuormitusvirran mukaisesti ja nollajohtimella pitäisi olla sama poikkipinta-ala kuin vaihejohtimella. (Yliaallot ja kompensointi 2018, 32.)

Haitallisin ilmiö, joka liittyy yliaaltoihin, on resonanssi. Yliaaltojännitteet tai virrat voivat jopa moninkertaistua, jos yliaallon taajuus on verkon resonanssitaajuuden lähellä, ja resonanssi pääsee syntymään. Resonanssi syntyy verkossa johonkin osaan siellä esiintyvien kapasitanssien ja induktanssien välille. Resonanssi voi olla joko sarjassa tai rinnan. Vaarallisempi näistä on rinnakkaisresonanssi, joka voi muodostua esimerkiksi loistehon kompensointilaitteiston ja syöttävän muuntajan tai kuormien välille. Rinnakkaisresonanssissa jännite säröytyy voimakkaasti ja virta voi nousta resonanssipiirissä moninkertaiseksi. (Yliaalto-opus 2008.) Rinnakkaisresonanssia ei kuitenkaan voi syntyä kompensointilaitteistoilla, jossa kondensaattoriparistojen lisäksi on estokelat.

4.4.3 Yliaaltojen ehkäisy ja suodatus prosessiteollisuudessa

Yliaaltoja voidaan sähköverkossa hallita ylimitoittamalla verkkoa, minimoimalla niiden synty ja suodattamalla. Ylimitoitus on perinteinen tapa, jolla pystytään hallitsemaan sekä yliaaltoja että loistehoa, mutta se ei ole taloudellisesti kovin kannattavaa. (ABB TTT-käsikirja 2000–07.) Yliaaltoja voidaan myös suodattaa useilla erilaisilla laiteratkaisuilla, ja suodattimet voidaan jakaa passiivisiin ja aktiivisiin suodattimiin. Yliaaltojen suodatus yhdistyy monesti etenkin teollisuudessa käytettyyn kompensointiin, koska loistehon kompensoinnissa käytetyillä laitteilla on myös yliaaltoja suodattavaa vaikutusta. Käytetyt ratkaisut ovat riippuvaisia kompensoitavien laitteiden tyypeistä sekä yliaaltojen määrästä verkossa. Teollisuuden 400 V:n pienjänniteverkossa ratkaisuja voidaan ryhmitellä muun muassa laitekohtaiseen, ryhmäkohtaiseen ja keskitettyyn kompensointiin sekä pelkkään kompensointiin tai kompensointiin ja yliaaltojen suodattamiseen. (Yliaallot ja kompensointi 2018, 48.) Teollisuudessa käytetyin tapa on keskitetty kompensointi, jossa kompensointilaitteisto sijoitetaan pää- tai ryhmäkeskukseen. Laitteina voidaan käyttää estokelakondensaattoriparistoja tai aktiivisuodattimia. Rinnakkaisparistoja ei voi suositella yliaaltopitoiseen verkkoon rinnakkaisresonanssien vuoksi.

Verkoissa, joissa esiintyy yliaaltoja, on mietittävä kompensoinnin toteutustapaa. Vaativissa kohteissa, kuten esimerkiksi terästeollisuudessa valokaariuunien, valssikäyttöjen ja senkkauunien tapauksessa tyristorihjattua staattista kompensointilaitteistoa käyttämällä saavutetaan nopea jännitteiden ja loistehon kompensointi. Yksi paljon käytetty vaihtoehto teollisuudessa on kuitenkin estokelakondensaattoriparistoilla toteutettu kompensointi, jolla saavutetaan vaadittu kompensointi loisteholle ja samalla saadaan yliaaltoja suodattavaa vaikutusta.

Estokelaparistojen yliaaltoja suodattavaan vaikutukseen voidaan vaikuttaa estokelan viritystaajuudella. Saavutettuun suodatusvaikutukseen vaikuttaa viritystaajuus ja kompensoinnin teho. Viritystaajuus tulee mitoittaa verkossa esiintyvien yliaaltojen mukaisesti, ja samalla tulee muistaa viritystaajuuden poikkeaman eniten verkossa esiintyvistä yliaaltotaajuuksista aiheuttama suodatusvaikutuksen laskeminen. (Yliaallot ja kompensointi 2018, 53.) Umicoren tehtaalla käytössä on juuri estokelakondensaattoriparistoilla toteutettu keskitetty kompensointi. Se on ollut ainoana yliaaltoja suodattavana tekijänä tehtaalla.



KUVA 2. Uuden tuotanto-osaston estokelaparistot

5 EMC:N HALLINTA TEOLLISUUDEN SÄHKÖASENNUKSISSA

Luvussa käsitellään EMC-suojauksen kannalta tärkeitä tekijöitä ja havainnollistetaan käytännön toteutuksia. Tarkkaa ja yksityiskohtaista useita erilaisia järjestelmiä koskevaa ohjeistusta tässä työssä ei kuitenkaan esitetä aiheen rajaamiseen ja ylipäätään EMC-suojauksen luonteeseen johtuvista syistä. Vaatimustenmukaisessa suunnittelussa ja asennuksessa käytettävät toimenpiteet ovat EMC-kysymyksissä perusmenetelmiltään pääsääntöisesti samoja, mutta aina on tapauskohtaisia erityispiirteitä riippuen järjestelmistä ja ympäristöstä. Siksi tulee aina noudattaa standardia, laitevalmistajien ohjeita ja tapauskohtaisesti määrittää tarvittavat toimenpiteet EMC:n hallintaan. Kappaleen ohjeistus sisältääkin yleispäteviä perusmenetelmiä EMC-suojaukseen.

5.1 Suunnittelun näkökohtia

Sähkölaitteiston hyvän häiriönsuojauksen voidaan katsoa alkavan jo suunnittelussa. Hyvä suunnittelukäytäntö tarkoittaa pääpiireittäin soveltuviin standardien noudattamista. Sähköasennusten EMC-vaatimusten kohdalla tämä standardi on SFS 6000 ja standardin luku 444, jossa on ohjeita EMC-häiriöiden ehkäisyyn ja niiltä suojaamiseen kiinteissä sähköasennuksissa. Standardia voi olla vaikea soveltaa tiettyyn kohteeseen, koska vaaditut ratkaisut vaihtelevat ja ovat erilaisia. Kaikkia menetelmiä ei siis ole tarpeellista aina soveltaa ja se vaikeuttaa suunnittelua, koska tarvittavien toimenpiteiden määrittely vaatimusten huomioimiseksi on suunnittelijan tehtävä. Standardit eivät myöskään kata kaikkia erityisiä olosuhteita, jolloin suunnittelijan tiedot sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta, siihen liittyvistä häiriöiden kytkeytymismekanismeista ja häiriöiden synnystä tulevat tarpeeseen, jotta hyvien suunnittelun ja asennustapojen mukainen kokonaisuus voidaan tehdä. (D1 2022, 165.) Oikeissa toimintaympäristöissä EMC:n hallinta on hyvä ajatella niin, että pyritään hyviin ja toimiviin ratkaisuihin, jotka eivät ole kuitenkaan liian monimutkaisia toteutettaviksi (Ylinen 2018, 184).

Kohdekohtainen määrittely suunnitteluvaiheessa sisältää laitevalinnat ja laitteiden sijoittelun, maadoitukset ja potentiaalintasaukset, johtotiet ja kaapeleiden tyypit ja ympäristön vaatiessa mahdollisten suodattimien käytön. Hankittavien laitteiden soveltuminen käyttöympäristöön tulee varmistaa, ja hyvänä periaatteena laitteiden sijoittelussa on, että suurivirtaisten ja suuritaajuisia virtoja synnyttävien laitteiden lähelle ei sijoiteta herkkiä laitteita. Suurivirtaiset tai suuritaajuisia virtoja synnyttävät laitteet ja järjestelmät, kuten esimerkiksi muuntajat, taajuusmuuttajat, tasasuuntaajat, suuret keskuskeskukset ja kaapelit ovat aina potentiaalisia häiritsijöitä. (ST 51.02 2023, 4–5.)

5.2 EMC-vaatimusten täytyminen sähköasennuksissa

Sähköasennuksilta ei odoteta arviointimenetelmiä vaatimustenmukaisuudesta niin kuin sähkölaitteilta. Tämä johtuu siitä, että kiinteää sähköasennusta ei siirrettä toiseen paikkaan ja sitä on mahdollista muuttaa. Sen sijaan sähköasennusten kohdalla täytyy noudattaa hyviä käytäntöjä suunnitteluvaiheessa ja asennuksessa sekä laitevalmistajien ohjeita laitteiden asennuksesta, käytöstä, hoidosta sekä huollosta. Sähkölaitteiston haltijalle tulee myös luovuttaa dokumentit, joista tulee ilmi käytetyt EMC-ratkaisut. Dokumentit tulee säilyttää niin kauan, kun kyseinen sähkölaitteisto on käytössä. (D1 2022, 165.)

Kiinteiden asennusten kohdalla asennukset tehdään paikkaan, joka on ennalta suunniteltu. Laitteiden käyttöohjeissa määritellyt vaatimukset käyttöpaikalle sisältävät esimerkiksi vaatimuksia suojalaitteista tai suodattimista, ympäristöolosuhteiden määrittelyt, kaapeleiden ja niiden pituuksien määrittelyt ja käytön ehtoja sekä erityisiä tarvittavia toimenpiteitä EMC- suojaukseen. (D1 2022, 165.) Sähköasennuksen tekijälle eli useimmiten urakoitsijalle asennusten kannalta tärkeimmät ohjeistukset ja tiedot tulevat ilmi laite- ja suunnitelmakohtaisista ohjeista. Laitevalmistajien ohjeet voidaan rinnastaa määräykseen EMC-kysymyksissä. (Ylinen 2018, 181.)

5.2.1 Häiriönsuojaus standardeissa

Standardin SFS 6000-4-44 luvussa 444 on kerrottu toimenpiteistä sähköasennuksia koskien, joilla pyritään pienentämään ja ehkäisemään sähkömagneettisia häiriöitä ja niiden vaikutuksia. Mainitut toimenpiteet jättävät soveltamisen varaa suunnitteluun ja asennukseen. Alla luetteloituna standardissa mainittuja keinoja häiriönsuojauksen parantamiseksi (SFS 600-1:2022, 148–150.):

- Laitteille, jotka ovat herkkiä sähkömagneettisille häiriöille suositellaan asennettavaksi ylijännitesuojia ja/tai suodattimia.
- Käytetään samoja reittejä voima- ja tietoliikennekaapeleille, jotta vältetään induktiivisten silmukoiden syntyminen. Samalla kuitenkin voima- ja tietoliikennekaapelit pidetään erillään toisistaan. Näiden kaapeleiden väliset risteämiskohdat tulisi tehdä 90 asteen kulmassa, jos vain mahdollista.

- Kaapeleiden armeeraukset, eli johtavat metalliset vaipat tai verhoukset yhdistetään käytössä olevaan yhteiseen potentiaalintasausverkkoon.
- Konsentrisen suojajohtimen omaavien kaapeleiden käyttäminen suojajohtimeen indusoituvien virtojen vähentämiseksi.
- Taajuusmuuttajakäytöissä noudatetaan valmistajan ohjeita kaapeleista, kaapeloinneista ja mahdollisista suodattimista.
- Tietoliikennekaapeloinneissa käytetään vaatimusten mukaisia kaapeleita ja ne asennetaan ohjeiden mukaisesti.
- Salamasuojajärjestelmän ollessa asennettu, noudatetaan SFS-EN 62305-3 standardin mukaisia minimietäisyyksiä tai suojauksia voima- ja tietoliikennekaapelointien ja salamasuojajärjestelmän alastulojohdinten välillä.
- Potentiaalintasauksessa pyritään mahdollisimman pieniin impedansseihin.

5.2.2 Teollisuuden hankkeet ja laajennusprojektit

Hankkeen sisältäessä erityisiä tasoja vaatimusten osalta, on tilaajan ja suunnittelijoiden määriteltävä urakoitsijalle laadittavassa työselvityksessä vaatimukset, ja se millä perusteilla ja edellytyksillä työ voidaan hyväksyä. Tällöin tilaajalla on konkreettiset edellytykset tunnistaa urakoitsijan toimittamien asennusten ja järjestelmien hyvä laatu ja vaatimustenmukaisuus myös sähkömagneettisen yhteensopivuuden osalta. Paras keino EMC:n hallintaan ja vaatimusten saavuttamiseen on tilaajan oma kokemus ja tieto, joka mahdollistaa myös laadukkaiden palveluiden tunnistamisen. Tilaajan tai mahdollisen tilaajan edustajan tulisi myös olla oikean tiedon hankkimiseen ja sen soveltamiseen motivoitunut. Toimintahäiriöt ja erimielisyydet voidaan välttää noudattamalla alusta alkaen toimintatapaa, jossa työn vaatimukset pystytään määrittelemään selkeästi asiakirjoihin ja ne ovat mitattavissa konkreettisesti. (Ylinen 2018, 181.)

Suunnittelussa määriteltyjen toimenpiteiden toteutumisen varmistamiseksi olisi asennuksessa noudatettava aina suunnitelmia ja pidettävä niistä kiinni. Muutokset ovat projektien aikana yleisiä, mutta muutoksienkin tulee noudattaa alkuperäistä suunnitelmaa, jotta vaatimukset voitaisiin täyttää. Suunnittelijan ja urakoitsijan välillä olisi hyödyllistä olla sovittu toimintatapa muutostilanteiden varalta. (Ylinen 2018, 182.)

5.2.3 Käyttöönottotarkastus

EMC-vaatimusten toteutumisen tarkastaminen käyttöönottotarkastuksessa tehdään aistinvaraisesti, jolloin todetaan muun muassa seuraavien kohtien toteutuminen (Rousku 2018, 49):

- TN-S järjestelmää on käytetty.
- Maadoitukset ja potentiaalintasaukset on toteutettu oikealla tavalla häiriönsuojauksen kannalta.
- Asennusympäristö on huomioitu laitevalinnoissa.
- Kaapeleiden valinta, sijoittelu ja asentaminen on toteutettu huomioiden standardissa SFS 6000-luvussa 444 esitetyt vaatimukset.
- Laitevalmistajien luomia asennusohjeita on noudatettu esimerkiksi maadoituksissa, kaapeloinneissa ja kaapelipituuksissa.

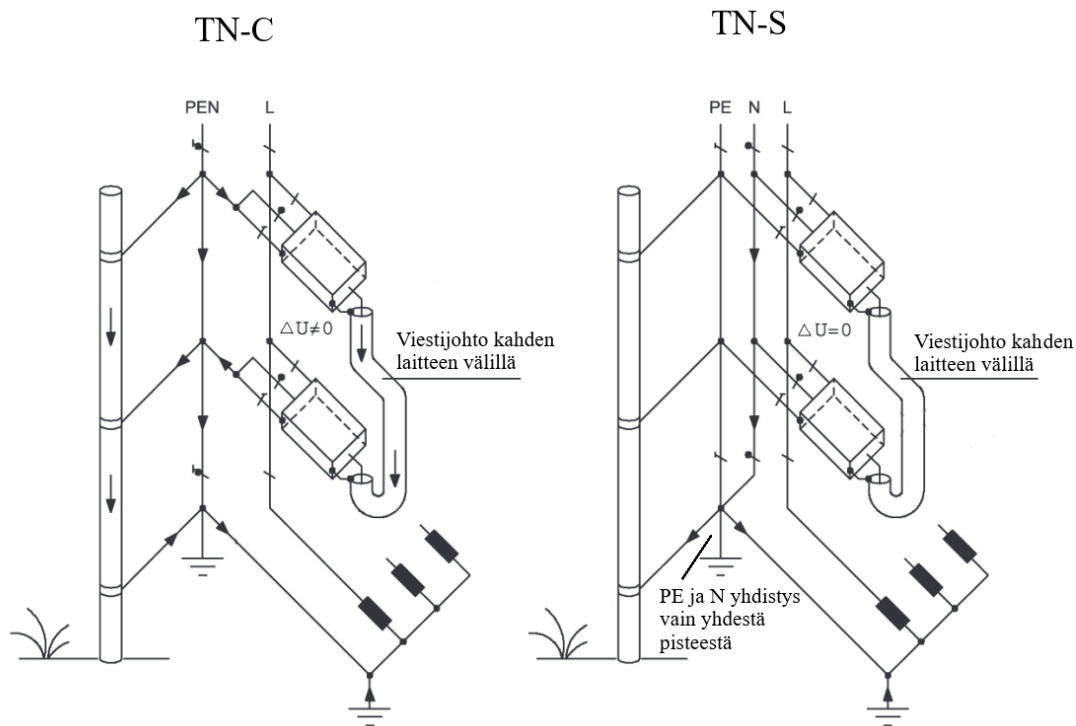
5.2.4 Vaatimusten pysyvyys asennuksissa

Sähköasennusten ja järjestelmien EMC-ominaisuudet voivat kärsiä esimerkiksi muutostöiden vuoksi. Etenkin etäisyyksiin, koteloiteihin tai maadoituksiin perustuvat suojausmenetelmät voivat olla alttiita myöhemmin tehtävien muutos- ja kunnossapitotöiden vaikutuksille. Hyvän dokumentoinnin avulla muutostöitä tekevä osapuoli pystyy huomioimaan tietyt asiat tehdessään muutoksia asennuksiin ja järjestelmiin. (Ylinen 2018, 183.) Teollisuuden kunnossapidossa ei oman kokemuksen mukaan tehdä suurempia muutostöitä, mutta yleistä on esimerkiksi taajuusmuuttajaan ja moottorikaapelointiin liittyvät toimenpiteet esimerkiksi taajuusmuuttajan ja oikosulkumoottorin vaihdon ja vianhaun yhteydessä. Huomiota tulisi kiinnittää erityisesti 360-asteisen maadoituksen toteutumiseen myös kaapeleiden takaisin kytkemisen jälkeen.

5.3 TN-S

Sähkönjakelujärjestelmillä on merkittävä osa EMC-ongelmien ehkäisyn ja vähentämisen saavuttamisen kannalta. Häiriönsuojauksen näkökulmasta TN-S järjestelmän käyttö on erittäin tärkeää ja se onkin nykyään uudisrakennuksissa oletus. TN-C järjestelmä on huono häiriönsuojauksessa, koska harhavirrat pääsevät kulkemaan PEN-johtimen kautta ja se on monesta kohdasta yhteydessä maahan. Oikein toteutetussa TN-S järjestelmässä nolla on yhdistetty maahan vain yhdestä pisteestä, eikä harhavirtoja tällöin

pääse metallirakenteisiin tai putkistoihin. Myöskään epäsymmetrisistä kuormista ja yliaalloista syntyneet virrat eivät tällöin kulkeudu suojamaadoitusjohtimia pitkin ympäristön laitteisiin tai järjestelmiin häiritsevinä harhavirtoina. Suojajohtimen yhdistys nollajohtimeen vain yhdestä pisteestä on TN-S järjestelmän tärkein perusvaatimus, ja silloin järjestelmää voidaan pitää oikeaoppisesti toteutettuna. Yhdistys voidaan toteuttaa pääkeskuksella tai muuntajalla. (Ylinen 2018, 46–47.)



KUVIO 12. Havainnollistava kuva TN-S järjestelmän hyvistä puolista häiriösuojauksessa. (Mukaillen ST 53.21 2022, 5)

5.4 Potentiaalintasaus ja maadoitukset

Maadoitus ja potentiaalintasaus muodostavat sähköjärjestelmän turvallisen sekä luotettavan toiminnan ja niillä on merkittävä vaikutus myös häiriöiden syntymisessä ja niiden vaikutusten minimoinnissa (Rousku 2023, 51). Suojamaadoituksessa tavoitellaan pientä resistanssia maahan, eli pientä maadoitusresistanssia, kun taas häiriösuojaukseen tarkoitetuissa maadoituksissa tavoitteena on pieni aaltoimpedanssi, joka on välttämätön häiriö- ja ylijännitteiden vaimentamiseksi. Sähköturvallisuuden ja häiriösuojauksen vaatimusten ollessa ristiriidassa tulee kuitenkin sähköturvallisuus laittaa edelle. (Ylinen 2018, 50.)

Maadoitus tarkoittaa siis kirjaimellisesti yhdistämistä maahan, kun taas potentiaalintasauksella tavoitellaan potentiaalierojen tasaamista eri osien välillä. Sillä miten maadoitus ja potentiaalintasaus on toteutettu, on myös suuri vaikutus sen häiriöiltä suojaavaan vaikutukseen. Tässä työssä käsitellään ainoastaan häiriösuojauksen parantamiseksi tehtäviä maadoituksia ja potentiaalintasauksia.

5.4.1 Maadoitus- ja potentiaalintasausjärjestelmiä

Jos rakennuksessa on tietotekniikan laitteistoja, voidaan tapauskohtaisesti hyödyntää erilaisia maadoitus- ja potentiaalintasaus järjestelmiä. Standardin SFS6000-4-44 luvussa 444 on mainittu perusmenetelmiä riippuen laitteiden herkkydestä, määrästä ja tärkeydestä. (Ylinen 2018, 51.) Standardissa on mainittu myös tarkentavia määrytyksiä liike ja teollisuusrakennuksiin, jotka käsittävät suuria määriä erilaisia tietotekniikan laitteita tai pieniä ryhmiä toisiinsa yhteydessä olevia vaativia tietoliikennelaitteita. Yhtenä esimerkkinä standardissa on esitetty tähtiverkko, jossa hyödynnetään erillisiä silmukoiden toteutettuja potentiaalintasaukseen käytettäviä verkkoja. Kuten luvussa aikaisemmin myös mainittiin, on tarvittavat menetelmät tapauskohtaisia ja määriteltävä suunnittelussa. (SFS 600-1:2022, 164–166.)

5.4.2 Potentiaalintasaus EMC-suojauksessa

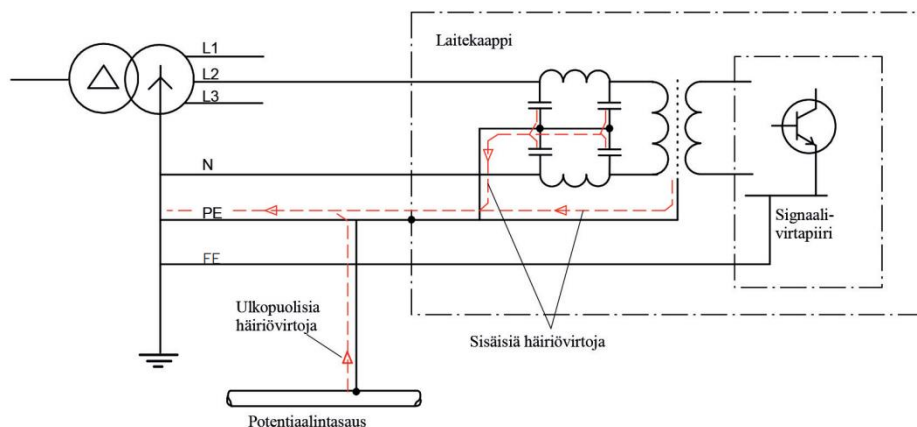
Potentiaalintasauksen tarkoituksena on siis liittää yhteen rakennuksen johtavat ja jännitteelle alttiit osat, jotta saavutetaan niiden välinen tasapotentiaali. Potentiaalintasauksen merkitys häiriöiden torjumiskeinona ei usein nouse esiin, vaan huomiota kiinnitetään maadoittamiseen ja maadoitusresistanssiin. Potentiaalintasauksen merkitys häiriöiden torjunnassa on kuitenkin merkittävä, ja yhdistämällä rakennuksen kaikki maadoitettavat järjestelmät päämaadoituskiskoon sekä lisäksi hyödyntämällä lisäpotentiaalintasauksista, ei maadoitusresistanssin arvolla ole häiriönsuojauksen kannalta ratkaisevaa merkitystä. (Ylinen 2018, 53–54.) Ylinen (2018, 54) on myös havainnollistanut asian hyvin lentokoneen potentiaalintasauksella. Lentokoneessa maadoitusresistanssin ollessa ääretön, on kuitenkin häiriöistä syntyneet ongelmat saatu ratkaistua. Lentokoneessa häiriöiltä suojaaminen on toteutettu juuri potentiaalintasauksella yhdistämällä sähkö- ja elektroniikkalaitteet yhteiseen potentiaalintasausjärjestelmään. Samaa periaatetta voidaan soveltaa myös rakennukseen, vaikka potentiaalintasausverkko ei rakennuksessa olekaan häiriönsuojauksen näkökulmasta yhtä tiivis. Rakennuksen useita yhtenäisiä metallisia

rakenteita, kuten raudoituksia, IV-kanavia ja putkia voidaan käyttää potentiaalintasausjärjestelmän rakentamiseen sähkö-, automaatio- ja tietoliikennelaitteiden maadoitettavien osien kanssa. Potentiaalintasauksen myötä rakennukseen saadaan luotua verkko, joka on yleensä riittävän tiivis häiriötasojen vähentämiseen rakennuksen tiloissa.

5.4.3 Toiminnallinen maadoitus

Elektroniset laitteet ja teollisuuden automaatiolaitteet voivat vaatia häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi niin sanotun vertailupisteen, joka on maan potentiaalissa. Sähkömagneettisen yhteensopivuuden varmistamiseksi täytyy esimerkiksi automaatiolaitteiden kaapeleiden suojajohtimia yhdistää maan potentiaaliin, jolloin näihin kaapeleihin syntyneet häiriöjännitteet saadaan johdettua maahan. Toiminnallisella maadoituksella (eng. Functional Earthing, FE) ei ole mitään tekemistä sähköiskulta suojaamisessa ja sen johtimet ovatkin nykyisin uusissa asennuksissa vaaleanpunaisia, ja niissä on uuden standardin mukaiset tunnuksset (FE). Ennen tunnusvärinä käytettiin mustaa ja tunnuksina TE. Vanhaa väriä ja tunnusta voidaan yhä käyttää asennuksissa, jos kyseessä on olemassa olevan asennuksen korjaaminen tai laajentaminen. (Rousku 2023, 59.)

ST-kortissa 51.02 (2011, 5) toiminnallisen maadoituksen tuoman häiriöltä suojaavan vaikutuksen periaate on havainnollistettu hyvin (KUVIO 13).



KUVIO 13. Periaate toiminnallisessa maadoituksessa. (ST 51.02, 2011, 5)

Umicorella toiminnallista maadoitusta käytetään muun muassa instrumentoinnin kenttäkaapeilla ja sähkötilojen IO-kaapeilla. Sähkötilan FE-kisko on yhdistetty maadoituskiskoon EB MK kevi johtimella ja FE-kiskolta toiminnalliset maadoitusjohtimet on kaapeloitu kohteisiinsa (KUVA 3). Yhtenä

esimerkkinä voidaan esittää Sähkötilan IO-kaappi, jonka FE-kiskoon toiminnallinen maadoitusjohdin on asennettu (KUVA 3). IO-kaapille tulevien Nomak- kaapeleiden suojajohtimet on yhdistetty IO-kaapin FE-kiskoon (KUVA 4).



KUVA 3. Sähkötilan FE-kisko ja FE-johtimen yhdistys IO-kaapin kiskoon.



KUVA 4. NOMAK-kaapeleiden suojajohtimet IO-kaapin FE-kiskossa.

Toiminnallisen maadoituksen käyttö ei ole nykyään uusissa asennuksissa yhtä yleistä kuin ennen. Toiminnallisen maadoituksen mahdollisena ongelmana ovat pitkät FE-johtimet, joista muodostuu monissa tapauksissa etenkin suuritaajuisille häiriöille alttiita laajoja verkostoja. (Ylinen 2018, 53.)

5.5 Taajuusmuuttajien asennus

Tässä kappaleessa havainnollistetaan taajuusmuuttajan asennuksessa häiriönsuojauksen kannalta tärkeitä asioita. Taajuusmuuttajan ja koko nopeussäädetyt käytön, eli taajuusmuuttajan ja sillä ohjattavan oikosulkumoottorin asennuksessa on oltava häiriönsuojauksen näkökulmasta tarkkana. Tässä kappaleessa esitellyt toimenpiteet taajuusmuuttajan häiriönsuojauksessa ovat yleispäteviä ja aina tulee muistaa taajuusmuuttajamallien mahdolliset ominaispiirteet ja tapauskohtaiset erityispiirteet, jotka tulee ottaa huomioon. Kappale onkin yleispätevä ohje taajuusmuuttajan asennukseen teollisuusympäristössä häiriönsuojauksen näkökulmasta, mutta ei korvaa laitekohtaisia asennusohjeita, joita tulee aina noudattaa.

5.5.1 Voimakaapelointi käytännössä

Oikealla tavalla tehty taajuusmuuttajan voimakaapelointi ja erityisesti moottorikaapelointi vaikuttaa merkittävästi käytön EMC-ominaisuuksiin. Moottorikaapeloinnilla tarkoitetaan taajuusmuuttajan lähliittimien ja moottorin välistä kaapelointia sisältäen komponentit, kuten EMC-turvakytkimet ja läpivientiholkit. Yleisiä hyviä käytäntöjä moottorikaapelointiin on muun muassa (Engineered drives manual, 39–42):

- Symmetristen ja suojattujen kaapeleiden käyttäminen. Hyvä vaihtoehto esimerkiksi MCCMK.
- Moottorikaapelin laitekohtaisen maksimipituuden huomioiminen.
- Vähimmäisetäisyyksien noudattaminen muiden kaapeleiden kanssa yhdensuuntaisilla kaapelivedoilla.
- 90-asteinen risteytyminen ohjauskaapeleiden kanssa.
- 360-asteinen maadoittaminen käytön jokaisessa liitäntäkohdassa. Turvakytkimet ja läpivientiholkit tulevat olla EMC-kelpoisia, jotta maadoitus voidaan toteuttaa.
- Maadoitusjohtimien pitäminen mahdollisimman lyhyinä kytkentäkohdissa.

Taajuusmuuttajien ohjeissa on erilaisia vaatimuksia kaapeleita koskien, ja varsinkaan syöttökaapelille ei välttämättä ole tiukkoja vaatimuksia. Hyvänä ja suositeltavana käytäntönä voidaan kuitenkin pitää MCCMK tai ominaisuuksiltaan vähintään vastaavan kaapelin käyttöä taajuusmuuttajan syöttö- ja moottorikaapeloinnissa, kuten Umicoren viime vuosina toteutetuissa laajennusprojekteissa on tehty. MCCMK on symmetrinen ja kaapelissa on konsentrisen kupariverkon lisäksi kuparifolio, joka ympäröi kaapelia antaen hyvän suojan moottorikaapelista vapautuvalle säteilylle.

Häiriösuojauksen kannalta hyvässä moottorikaapeloinnissa symmetrinen häiriösuojattu kaapeli maadoitetaan 360-asteisesti taajuusmuuttajalla, turvakytkimellä ja moottorilla. Tällöin saavutetaan koko taajuusmuuttajakäytön matkalta suoja, joka suojaa häiriöiden vapautumiselta ympäristöön. Suojan jatkuvuus on häiriösuojauksen kannalta tärkeää, ja 360-asteinen maadoitus tulisi muistaa tehdä laadukkaasti myös turvakytkimellä, joka sijoitetaan taajuusmuuttajan ja moottorin väliin. 360-asteista maadoitusta tulisi lähtökohtaisesti noudattaa ja se olisi suositeltavaa, vaikka esimerkiksi seinään kiinnitettävien Vacon-100 taajuusmuuttajien asennusohjeessa 360-asteinen maadoitus vaaditaan vain luokassa C2. ABB:n pienjännitemoottoreiden asennus-, käyttö-, kunnossapito- ja turvallisuusohjeessa (2022, 17) mainitaan, että yli 30 kW moottoreissa tulisi käyttää symmetrisiä häiriösuojattuja kaapeleita ja 360-asteista maadoitusta.

Taajuusmuuttajalla 360-asteinen maadoitus tehdään niin, että kaapelin suojavaippa on koko ympärysmitaltaan kiinni laitteen rungossa (KUVA 5).



KUVA 5. MCCMK-kaapeleiden 360-asteinen maadoitus seinään kiinnitettävässä ja kaappimallisessa taajuusmuuttajassa.

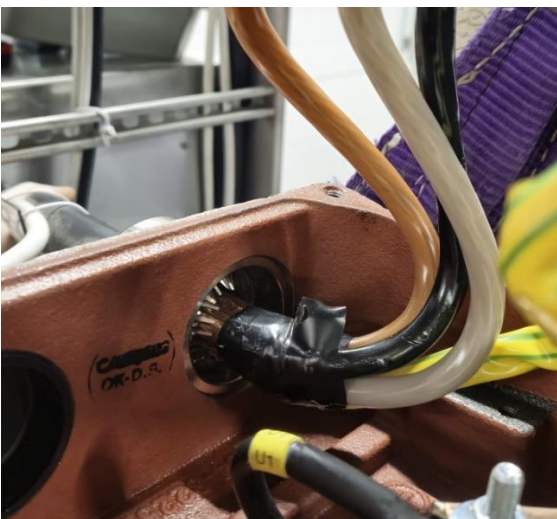
Taajuusmuuttajan ja moottorin välissä olevalla turvakytkimellä tehtävä 360-asteinen maadoitus jatkaa suojaa moottorille asti. Muovisissa EMC-turvakytkimissä on metallinen sisärakenne, johon yhdistetään kaapeleiden maadoitusjohtimet ja kaapeleiden suojavaipat esimerkiksi kiristysklemmarin avulla (KUVA 6). Muovisia läpivientiholkkeja voidaan siis käyttää turvakytkimen rungon ollessa muovia,

koska suojavaipat kiinnitetään sisäiseen metallirakenteeseen. Suurempien moottoreiden metallirakenteisissa turvakytkimissä tulee usein huolehtia erikseen sopivista tarvikkeista, kuten EMC-laipoista, joilla kaapelit saadaan maadoitettua 360-asteisesti turvakytkimen runkoon.



KUVA 6. 360-asteinen maadoitus turvakytkimellä.

Moottorilla 360-asteinen maadoitus toteutetaan useimmissa tapauksissa EMC-läpivientiholkin avulla. Läpivientiholkki koskettaa kaapelin suojavaippaa koko sen ympärysmitaltaan ja yhdistää sen moottorin runkoon (KUVA 7). Holkin on oltava oikeankokoinen, jotta 360-asteinen maadoitus toteutuu, koska joissain holkkitiivisteissä kaapelin runkoon maadoittava osa ei ole säädettävissä. Suuremmissa moottoreissa kaapeli tai mahdollinen kaksoiskaapelointi toteutetaan usein laipan avulla, jolloin moottorin mukaan noudatetaan kyseisen moottorin ohjeita ja suosituksia läpivienneistä.



KUVA 7. 360-asteinen maadoitus moottorin läpiviennissä.

5.5.2 Oikosulkumoottorit

Oikosulkumoottoreiden vaatimukset tulee myös tapauskohtaisesti ottaa asennuksessa huomioon. ABB:n pienjännitemoottoreiden asennus-, käyttö-, kunnossapito- ja turvallisuusohjeessa (2022, 17) ohjeistetaan moottoreille asennettavaksi IEC 280 runkokoosta ylöspäin potentiaalintasaus moottorin ja moottorin kuorman välille, jos molemmat eivät ole samalla johtavalla tasolla. ABB:n grounding and shielding of drive systems ohjeessa (2024, 25) on samanlainen vaatimus, mutta yli 100 kW moottoreille. Potentiaalintasauksella ei ole tekemistä turvallisuuden kanssa, vaan sitä käytetään ainoastaan tasapotentiaalilin saavuttamiseksi.

5.5.3 Yleisiä ohjeita Profinet-kaapelointiin

Tässä kappaleessa on yleisiä ohjeita taajuusmuuttajien kenttäväyläkaapelointiin. Kappaleessa käytetään esimerkkinä Umicorella paljon käytettyä Vacon-100 taajuusmuuttajaa ja sen väyläkaapelointia. Uusissa laajennusprojekteissa on käytetty Profinet-IO tiedonsiirtoprotokollaa taajuusmuuttajien ja automaatiojärjestelmän väliseen tiedonsiirtoon. Yleisiä ohjeita Profinet-kaapelointiin taajuusmuuttajakäytöissä on muun muassa (Vacon-100 asennusopas, 89–91):

- Suojattujen kaapeleiden käyttäminen vaatimusten mukaisesti. S/FTP CAT 6 erinomainen vaihtoehto (Suojattu, folioitu ja parikierretty).
- Reititys erillään moottorikaapeleista noudattaen valmistajan vähimmäisetäisyyksiä, ja mahdolliset risteytykset voimakaapeleiden kanssa tulisi tehdä 90-asteen kulmassa (KUVA 8).
- Sopivan mittaisten kaapeleiden käyttäminen ja kaapelin kerälle rullaamisen välttäminen antennivaikutuksen minimoimiseksi.
- Liian jyrkkien käännösten ja taivutusten välttäminen kaapelin suojausominaisuuksien säilyttämiseksi.
- Valmiskaapeleiden käyttäminen tai irtokaapelin ja erillisten liittimien käyttö sillä edellytyksellä, että ne asennetaan ohjeiden mukaan. Liittimen ja kaapelin suojavaipan yhdistyminen on tärkeää.
- 360-asteinen maadoitus tapauskohtaisesti ohjeiden mukaan.



KUVA 8. Profinet-kaapelointia, jossa on huomioitu 90-asteinen risteytyminen ja välimatkat.

Laitevalmistajien ohjeet antavat laitekohtaisia suosituksia ja tietoa laitteen ominaisuuksista. Esimerkiksi Vacon-100 taajuusmuuttajissa Ethernet kaapelin RJ45-liittimet yhdistävät kaapelin suojavaipan taajuusmuuttajan Ethernet liittimen maatasoon, jossa on sisäänrakennettu RC-piiri. Kaapelin suojavaippa voidaan siis yhdistää maatasoon sisäänrakennetun RC-piirin avulla, jolla on häiriöiltä estävää vaikutusta. RC-piiri saadaan käyttöön, kun laitteen potentiaalintasaus on kunnossa ja käytetään suojattua Ethernet kaapelia, jolloin vaippa yhdistyy RJ45-liittimeen. Häiriötasojen ollessa voimakkaita kaapeli voidaan myös maadoittaa molemmista päistä suoraan 360-asteisesti maahan, jos laitteiden välillä ei ole potentiaalieroja. Jos potentiaalieroja on, tulee noudattaa vain toisesta päästä maadoittamista, ettei mahdollisia häiriövirtoja kulje suojavaipassa. (Vacon-100 asennusopas, 92–93.)

5.5.4 Yleisiä ohjeita ohjauskaapelointiin

Ohjauskaapeleilla siirretään teollisuudessa muun muassa digitaalisia ja analogisia signaaleita esimerkiksi taajuusmuuttajan ja tehtaan automaatiojärjestelmän välillä. Ohjauskaapeleina tulisi käyttää suojavaipalla suojattuja kaapeleita ja noudattaa hyvää asennustapaa, jotta välttyttäisiin varmemmin häiriöiltä näiden signaaleiden siirrossa. Kappaleessa esitetyt ohjeet ohjauskaapelointiin ovat esitetty erityisesti taajuusmuuttajakäyttöä ajatellen, mutta ne ovat päteviä myös muiden järjestelmien ohjauskaapelointeihin soveltuvien osin. Yleisesti ohjauskaapelointiin voidaan antaa seuraavat ohjeet (grounding and cabling of drive systems 2024, 31–34):

- Suojattujen ja parikierrettyjen ohjauskaapeleiden käyttäminen huomioiden valmistajan asennusohjeet. Paras suoja saavutetaan kaksoisvaippaisella kaapelilla, jossa jokaiselle parille on myös oma suoja yhteisen suojan lisäksi.
- Digitaaliset ja analogiset signaalit suositellaan siirrettäväksi omissa kaapeleissaan. Kaapelin parien käyttö tulisi olla signaalikohtaista ja parikierto tulisi säilyttää mahdollisimman lähelle liittimiä.
- Vähimmäisetäisyyksien noudattaminen muiden kaapeleiden kanssa. Pitkiä rinnakkaisia kaapelivetoja voimakaapeleiden kanssa tulisi välttää ja ohjauskaapeleiden risteytyminen voimakaapeleiden kanssa tulisi tehdä 90-asteen kulmassa.
- Ohjauskaapelin 360-asteinen maadoittaminen tapauskohtaisesti.

Parikaapeleiden parien käyttö signaalikohtaisesti tarkoittaa parien käyttämistä niin, että signaalijohdin ja signaalille kuuluva signaalimaa ovat samalla parilla. Noudatettaessa signaalikohtaista parien käyttöä saadaan myös parikierron häiriöiltä suojaava vaikutus hyödynnettyä. Parikaapelin häiriönsuojaus pohjautuu parien symmetriaan, jolla saavutetaan symmetrinen siirto, jossa johtimet ovat samassa asemassa esimerkiksi juuri maahan nähden. Häiriöjännitteet tai häiriövirrat eivät pääse vaikuttamaan symmetriseen siirtoon, koska ulkopuolisen jännitteen kytkeytyminen pariin ei vaikuta johdinten väliseen jännitteeseen, ja häiriövirtojen kohdalla virrat kumoavat toinen toisensa symmetrisen parikierron ansioista. Symmetriaan perustuen myöskään ulkopuolelle ei synny sähkö- tai magneettikenttiä, koska johdinten jännitteet ovat vastakkaismerkkisiä ja virrat vastakkaissuuntaisia. Todellisuudessa täyttä symmetriaa, eli häiriöttömyyttä ei kuitenkaan saada koskaan aikaiseksi koko asennuksessa ja kaapeloinnissa, mutta vaikutus on silti merkittävä. (Ylinen 2018, 106, 185)

Ohjauskaapelin 360-asteinen maadoittaminen tulee tehdä tapauskohtaista harkintaa käyttäen ja mahdollisia ohjeita noudattaen. Ohjauskaapelin suojan 360-asteisella maadoittamisella toisesta päästä saavutetaan useimmissa tapauksissa magneettikentän ja induktiivisten häiriöiden vaimennus. Maadoitus molemmista päistä parantaa korkeilla taajuuksilla häiriöiden vaimennusta, mutta tällöin kaapelin päiden ollessa eri potentiaalissa voi muodostua silmukka, jossa voi kulkea matalataajuisia virtoja. Jos ohjauskaapelille tarvitaan suojaus korkeataajuisilta häiriöiltä, voidaan kaapelin toinen pää maadoittaa esimerkiksi kondensaattorin kautta. Joissain laitteissa kondensaattori on sisäänrakennettuna. Kaapeli voidaan myös maadoittaa molemmista päistä, jos ollaan varmoja, että kaapeleiden päät ovat samassa potentiaalissa. (grounding and cabling of drive systems 2024, 31–34.)

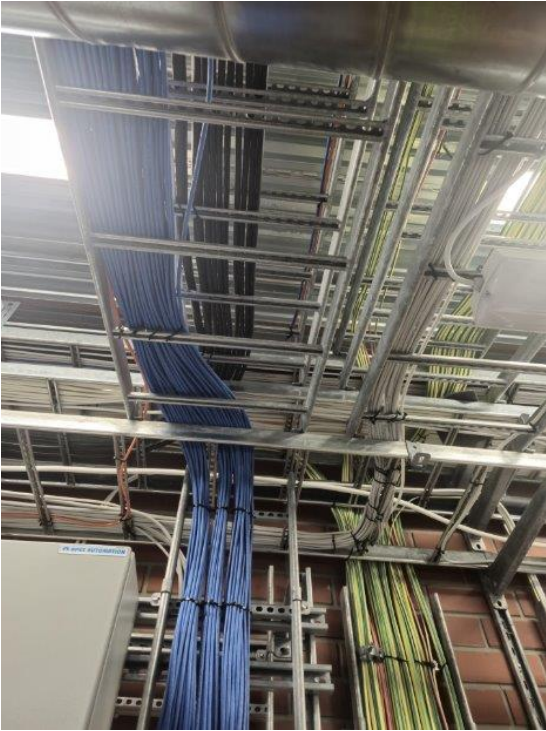
5.6 Johtotiet ja kaapelointi

Vierekkäin kulkevilla kaapeleilla, jotka kuuluvat eri järjestelmiin on iso vaikutus muun muassa häiriöiden siirtymisen kannalta. Ongelmana yleinen on esimerkiksi voimakaapeleiden ja ohjauskaapeleiden lähekkäisyys kaapelihyllyillä ja nousutikkailla. Rakennusten ahtaat nousukuilut ovat yksi esimerkki tilanteesta, joka vaikeuttaa kaapeleiden erillään pitämistä ja toisaalta vaikka erityyppiset kaapelit sijoitettaisiinkin eripuolille kaapelihyllyä, tulisi huolehtia siitä, ettei kaapelihyllyjä täytetä liikaa. (Ylinen 2018, 182) Teollisuudessa etenkin läpivienneissä ja palokatkoissa havaittuja ongelmia on kaapeleiden läpivientien ahtaus, jossa kaapelit ovat pahimmillaan kiinni toisissaan. Erotusvälimatkat tulisi ottaa huomioon koko kaapeloinnin pituudelta.

Kaapelointireitit tulisi valita huolellisesti harkintaa käyttäen, ja samansuuntaisesti kaapeloidut voima-, ohjaus- ja tietoliikennekaapelit tulisi sijoittaa omille hyllyilleen noudattaen vähimmäisetäisyyksiä. Eri-tyistä huomiota tulisi kiinnittää taajuusmuuttajien kaapeleihin. (Mäkinen, Kallio, Tantarimäki 2009, 45.) Vaatimuksia etäisyyksille eri johtojärjestelmien välillä on esitetty esimerkiksi yleiskaapeloinnin standardisarjassa SFS-EN 50174 ja standardissa SFS 6000-4-444. Etäisyydet ovat riippuvaisia muun muassa käytettyjen kaapeleiden tyypistä ja johtoteiden rakenteesta. Vähimmäisetäisyytenä voidaan käyttää 200 mm etäisyyttä, jos tyyppejä ei kaapeleiden tai johtoteiden osalta ole määritelty. (D1 2022, 166.) Laitevalmistajien ohjeet sisältävät myös usein vähimmäisetäisyyksiä erityyppisille kaapeleille.



KUVA 9. Organisoitua kaapelityyppikohtaista kaapelointia kaapelihyllyillä.



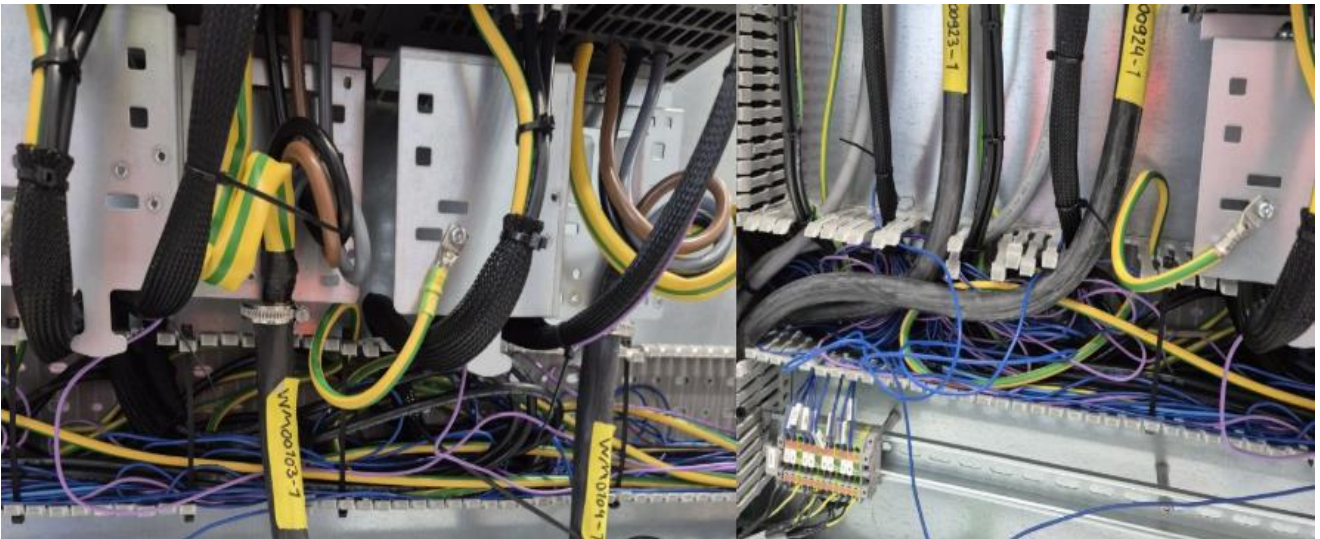
KUVA 10. Hyvää kaapeleiden erottelua.

5.7 Huono esimerkki

Ulkomaalaisen laitetoimittajan toimittama järjestelmä, joka tuli yhdelle uusista laajennusprojekteista on ollut ongelmallinen ja järjestelmässä on ilmennyt toimintahäiriöitä. Toimintahäiriöt ovat liittyneet kahteen taajuusmuuttajaan, joiden DI-tuloihin on tullut nopeita transientteja. Järjestelmässä ja kyseisessä keskuksessa on myös muita taajuusmuuttajia, mutta niiden ohjaus on toteutettu Profinet-väylällä IO-ohjauksen sijaan.

Epäilykset heräsivät, kun molempien taajuusmuuttajien DI-tuloja alkoi mennä rikki. Transientit tunnistettiin mittaamalla tuloja samalla kun muu järjestelmä oli normaalisti toiminnassa, ja tällöin todettiin yli 40 V:n jännitepiikkejä kyseisissä DI-tuloissa. Todellisuudessa jännitepiikit saattoivat olla tätä suurempiakin, mutta mittaushetkellä saatiin kiinni ainoastaan näitä hieman yli 40 V:n jännitepiikkejä. Rikkoontuneiden DI-tulojen lisäksi järjestelmässä alkoi ilmetä vaikeasti selvitettäviä toimintahäiriöitä, kun yhden taajuusmuuttajan DI-tulo alkoi aktivoitumaan satunnaisesti järjestelmän ollessa normaalisti toiminnassa. Häiriöstä aktivoituneen DI-tulon toiminto oli parametroitu tavalla, joka sai taajuusmuuttajan pysähtymään tulon aktivoituessa, ja häiriön ollessa nopea sekä satunnainen järjestelmä vain pysähtyi, eikä toimintahäiriöstä jäänyt vianhakua varten mitään jälkeä.

Keskusta alettiin häiriöiden tunnistamisen jälkeen tutkia tarkemmin, ja kouruja avatessa huomattiin, että keskus oli johdotettu huonosti. Ohjaus-, voima- ja moottorikaapeleiden kanssa ei ollut mitään erillisiä kouruja, vaan kaikki oli johdotettu samoissa kouruissa sekaisin (KUVA 11). Keskuksen suurivirtaiset syöttöjohtimet oli myös keskuksen pääkatkaisijan jälkeen kaapeloitu Profinet- ja ohjauskaapeleiden kanssa samaan ahtaaseen kouruun (KUVA 12).



KUVA 11. Huonoa johdotusta keskuksella.



KUVA 12. Toinen esimerkki keskuksen huonosta johdotuksesta.

Kyseiset toimintahäiriöt ovat harmillisia, koska niiden selvittäminen on vaikeaa ja aikaa vievää, ja tässä tapauksessa järjestelmä oli ollut jo käytössä hetken ennen häiriöiden ilmaantumista. Jännitepiikien lähteiksi pystyttiin ainakin olettamaan keskuksessa olevat kontaktorit, koska mitattaessa jännitepiikit nousivat aina kontaktorien toiminnan (vedon ja päästön) yhteydessä. Induktiivinen kytkeytyminen jonkin voimajohtimen kautta keskuksen sisäisissä johdotuksissa on myös yksi mahdollinen häiriöiden aiheuttaja, koska kaapin johdotukset olivat sekaisin sisältäen 24 V:n ohjausjohtimia sekä voimajohtimia ja voimakaapeleita samoissa kouruissa.

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä perehdyttiin sähkömagneettiseen yhteensopivuuteen, ja siinä tarkasteltiin aihepiirin keskeistä teoriaa, lainsäädäntöä ja standardeja sekä syvennyttiin erityisesti teollisuuden 400 V:n sähköasennuksiin ja taajuusmuuttajakäyttöjen EMC-ongelmien ehkäisyyn ja niiltä suojaamiseen. Työn tavoitteena oli luoda selkeä teoriaan ja käytäntöön perustuva ohjeistus ja tietopaketti, joka tukee teollisuuden prosessisähköistysten suunnittelua ja käytännön toteutusta vaatimusten mukaisella tavalla. Työssä esitetty teoreettinen tieto muun muassa taajuusmuuttajakäyttöjen aiheuttamista, ja muutenkin yleisesti teollisuutta koskevista ilmiöistä ja niiden torjunnasta on myös varmasti hyödyllistä yleistietoa kyseisten järjestelmien kanssa työskenteleville.

Työn tuloksena saatu ohjeistus tarjoaa yksinkertaisen ja hyödyllisen työkalun, joka auttaa ymmärtämään ja ennaltaehkäisemään sähkömagneettisia häiriöitä sekä niihin liittyviä ilmiöitä, ja täten varmistamaan teollisuuden järjestelmien luotettavan toiminnan monimutkaisissa teollisuuden toimintaympäristöissä. Kokonaisuudessaan työ korostaa huolellisten, mutta kuitenkin yksinkertaisten ja toimiviksi todettujen perusmenetelmien käyttöä suunniteltaessa ja asentaessa teollisuuden sähköjärjestelmiä.

Aiheena EMC on erittäin laaja, jonka vuoksi aiheen rajaaminen tuotti hieman vaikeuksia. Lähtökohdiana oli kuitenkin luoda työ sen tilaajan eli työnantajani ehdoilla, jotta työtä voitaisiin hyödyntää yrityksessä. Työn sisältö ja siinä käsitellyt aiheet valikoitiinkin Umicoren tehdasta ajatellen painottamalla sellaisia aihealueita ja laitteita, jotka ovat mahdollisimman relevantteja yritykselle. Vaikka tässä työssä ei läheskään kaikkea pystytty käsittelemään, on tällä työllä myös mielestäni oikeaan suuntaan ohjaavaa vaikutusta koko aiheen osalta sen tietoisuutta lisäävän vaikutuksen ansiosta. Tämä työ jättää myös yritykselle hyvän mahdollisuuden jatkokehitykseen esimerkiksi toisen aiheeseen liittyvän opinnäytetyön osalta, koska kuten työssä mainittiin, on riittävä kokemus ja tieto paras keino EMC:n hallintaan.

Tämän työn tekeminen oli erittäin hyödyllistä myös itselleni ja se syvensi omaa ymmärrystäni koko aihealueesta. Opin myös arvioimaan erilaisia ratkaisuja ja niiden soveltuvuutta erilaisissa tilanteissa sekä hahmottamaan muun muassa standardien ja määräysten roolia EMC:n hallinnassa. Kokonaisuudessaan työ oli mielestäni mukava toteuttaa, vaikka aiheena EMC on hieman hankala sen laajuuden ja moniulotteisuuden takia. Haluan kiittää opinnäytetyön ohjaajana toiminutta Kari Saarasta ja työelämäohjaajana toiminutta Umicoren sähkötöiden- ja käytönjohtajaa Toni Saloa ohjauksesta tässä koko opinnäytetyöprosessissa.

LÄHTEET

ABB. *Bearing currents and how to beat them*. Saatavissa: <https://new.abb.com/motors-generators/media/bearing-currents-and-how-to-beat-them>. Viitattu 16.02.2025.

ABB. 2024. *Grounding and cabling of drive systems*. Saatavissa: <https://library.abb.com/d/3AFY61201998>. Viitattu 25.3.2025.

ABB. 2018. *Bearing currents and their mitigation*. Saatavissa: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107336&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. Viitattu 16.02.2025.

ABB. 2022. *Pienjännitemoottoreiden asennus-, käyttö- ja kunnossapito-ohje*. Saatavissa: <https://library.abb.com/d/3GZF500730-85>. Viitattu 26.3.2025.

ABB. 2011. *Technical guide No. 5 - Bearing currents in modern AC drive systems*. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/8c253c2417ed0238c125788f003cca8e/ABB_Technical_guide_No5_RevC.pdf. Viitattu 16.02.2025.

ABB. 2012. *Technical guide No.3 - EMC compliant installation and configuration for a power drive system*. Saatavissa: <https://library.abb.com/d/3AFE61348280>. Viitattu 22.02.2025.

ABB. 2000. *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 10. p. Vaasa: Suomalaiset ABB-Yhtiöt. Saatavissa: <https://heikkilaakso.com/opetus/abb/>. Viitattu 25.1.2025.

CENELEC. *CENELEC and IEC Cooperation*. Saatavissa: <https://www.cenelec.eu/about-cenelec/cenelec-and-iec-cooperation/>. Viitattu 22.1.2025.

Chatterton, P. A. & Houlden, M. A. 1996. *EMC: Electromagnetic theory to practical design*. Chichester: Wiley.

Dahlström, J., Havunen, I., Isokorpi, J., Keikko, T., Mikkola, M., Rautee, J., Vanhanen, J., Lehtelä, R., Luoma, L., Virolainen, L., Tuusa, H., Kärnä, J., Nurmi, T., Nousiainen, K., Kumpulainen, L., Korpinen, L. 1998. *Sähkövoimatekniikkaopus*. Saatavissa: <http://leenakorpinen.com/fi/julkaisut/opetusaineistoja/>. Viitattu 02.03.2025.

Danfoss asiantuntija. 2025. *Vacon engineered drives manual*. Yksityinen sähköposti. 01.04.2025. Viestin saaja Eemil Mulari.

Danfoss asiantuntija. 2025. *Vacon-100 MR-4 runkoon taajuusmuuttajan päävirtapiiri ja komponentit*. Yksityinen sähköposti. 01.04.2025. Viestin saaja Eemil Mulari.

Danfoss. 2016. *Vacon-100 koulutusmateriaali*.

Danfoss. 2019. *Vacon-100 asennusopas, kaapitetut taajuusmuuttajat*. Saatavissa: <https://assets.danfoss.com/documents/277006/AN361179394701fi-000601.pdf>. Viitattu 7.4.2025.

Danfoss. 2019. *Vacon-100 selection guide*. Saatavissa: <https://assets.danfoss.com/documents/192529/AD397533798661en-010101.pdf>. Viitattu 14.3.2025.

- Danfoss. 2019. *Facts Worth Knowing about AC drives*. Saatavissa: <https://assets.danfoss.com/documents/latest/242341/AV446558536912en-000101.pdf>. Viitattu 01.04.2025.
- DI-Käsikirja rakennusten sähköasennuksista*. 2022. 30., painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- European Commission. *Harmonised standards*. Saatavissa: https://single-market-economy.ec.europa.eu/single-market/european-standards/harmonised-standards_en. Viitattu 22.1.2025.
- Sähköturvallisuuslaki*. 16.12.2016/1135. Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135#Pidm46263582969584>. Viitattu 22.1.2025.
- Valtioneuvoston asetus sähkölaitteiden ja –laitteistojen sähkömagneettisesta yhteensopivuudesta*. 21.12.2016/1436. Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161436>. Viitattu 22.1.2025.
- Falck, E., Korpinen, L., Keikko, T., Mikkola, M. 2008. *Yliaalto-opus*. Saatavissa: <http://leenakorpi-nen.com/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>. Viitattu 11.03.2025.
- IEC. TR 61000-5-1:fi. *Ohjeita sähkömagneettisten häiriövaikutusten minimoimiseen asennuksissa*. 2012. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>. Viitattu 25.1.2025.
- Koivisto, P., Ylinen, T., Björkman, M., Honkala, A., Marttila, H., Kettunen, L., Konttinen, A., Taimisto, S. 2018. *EMC ja rakennusten sähkötekniikka*. 3., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- Lapp Automaatio. *EMC-suojatut kaapelit ja liitinjärjestelmät teollisuuskäytössä*. Saatavissa: https://lappautomaatio.fi/lapp/_emc-suojatut-kaapelit-ja-liittimet. Viitattu 26.1.2025.
- Learn EMC. 2011. *Electromagnetic radiation*. Saatavissa: <https://learnemc.com/electromagnetic-radiation>. Viitattu 25.1.2025.
- Mäkinen, M., Koivisto, P. 2020. *Hyvät asennustavat: Sähkö- ja tietotekniset järjestelmät*. 3., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.
- Mäkinen, M. J. J., Kallio, R., Tantarimäki, R., Nyström, S. A. & Kallio, P. 2009. *Prosessiteollisuuden sähkö- ja automaatioasennukset*. Helsingissä: Otava.
- Männistö, M., Vitikka, V. 2006. *Yliaallot ja kompensointi*. Espoo: Sähköinfo.
- Ott, H. W. 2009. *Electromagnetic Compatibility Engineering*. Hoboken: John Wiley et Sons Ltd.
- Rousku, H. 2023. *Sähköasennusopas*. 11., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo.
- SESKO. *Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC)*. Saatavissa: <https://sesko.fi/standardointi/sahkomagneettinen-yhteensopivuus-emc/>. Viitattu 22.1.2025.
- SESKO. 2024. *Sähkömagneettisten häiriöiden rajoittaminen sähköistyvässä maailmassa*. Saatavissa: <https://sesko.fi/sahkomagneettisten-hairioiden-rajoittaminen-sahkoistyvassa-maailmassa/>. Viitattu 21.1.2025.
- Sevgi, L. 2017. *A practical guide to EMC engineering*. Boston: Artech House.

SFS-käsikirja 600–1:2022: Pienjännitesähköasennukset. 2022. 2. painos. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Suomen standardit. *SFS 6000 pienjänniteasennusten standardisarja*. Saatavissa: <https://sfs.fi/standardeista/tutustu-standardeihin/suosittu-standardit/sfs-6000-pienjannitesahkoasennusten-standardisarja/>. Viitattu 23.1.2025.

Sähkötieto ry. 2018. *ST 715.00: Taajuusmuuttajakäytöt, yleistä*. Espoo: Sähköinfo. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/search>. Viitattu 14.3.2025.

Sähkötieto ry. 2022. *ST 53.21: Rakennusten sähköasennusten maadoitukset ja potentiaalintasaukset*. Espoo: Sähköinfo. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/search>. Viitattu 28.3.2025.

Sähkötieto ry. 2023. *ST 51.02: EMC-näkökohdat sähkö- ja tietoteknisten järjestelmien suunnittelussa ja asennuksessa*. Espoo: Sähköinfo. Saatavissa: <https://severi.sahkoinfo.fi/search>. Viitattu 28.3.2025.

TUKES. *Sähkömagneettinen yhteensopivuus - EMC*. Saatavissa: <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkomagneettinen-yhteensopivuus-emc>. Viitattu 20.1.2025.

Umicore. *Umicore Kokkolassa*. Saatavissa: <https://www.umicore.fi/fi/sivustomme/>. Viitattu 17.1.2025.

Vacon. 2017. *Vacon-100 Du/Dt filter technical guide*. Saatavissa: <https://assets.danfoss.com/documents/latest/277736/AJ361178778699en-000101.pdf>. Viitattu 27.03.2025.

Vacon. 2001. *Vacon CX, CXL, CXS filter manual*. Saatavissa: <https://assets.danfoss.com/documents/latest/273770/BC361183021646en-000101.pdf>. Viitattu 27.03.2025.