



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU  
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Antti Veijalainen

# ASENNUSTEN MITOITUS JA VAATI- MUSTENMUKAISUUS

Tekniikka  
2020

## TIIVISTELMÄ

Tekijä	Antti Veijalainen
Opinnäytetyön nimi	Asennusten mitoitus ja vaatimustenmukaisuus
Vuosi	2020
Kieli	suomi
Sivumäärä	61 + 4 liitettä
Ohjaaja	Kari Jokinen

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastaa moottorikaapelointitaulukko sekä päivittää kyseinen valintataulukko vastaamaan Umicore Finland Oy:n tämänhetkisiä asennusvaatimuksia. Työssä perehdyttiin taajuusmuuttajan toimintaperiaatteeseen ja valittiin taajuusmuuttajille sopivat moottorikaapelit, ottaen huomioon asennustavat, lämpötilat ja moottorikaapeleiden pituudet. Tämän lisäksi käytiin läpi moottorikeskusten lähtöratkaisuja sekä suojausten toteuttamista.

Työssä käytettiin hyödyksi taajuusmuuttajavalmistajien laitemanuaaleja. Taajuusmuuttajan valinnan jälkeen suoritettiin tarvittavat mitoitukset ja laskelmat sekä valittiin kaapelit moottoreille näiden perusteella.

Työssä saatiin luotua ja tarkastettua moottorikaapelointitaulukko, jota voidaan käyttää asennettaessa uusia moottorikaapeleita taajuusmuuttajalta sähkömoottoreille Umicore Finland Oy:n tuotantotiloissa.

## ABSTRACT

Author	Antti Veijalainen
Title	Dimensioning and Compliance of Installations
Year	2020
Language	Finnish
Pages	61 + 4 Appendices
Name of Supervisor	Kari Jokinen

---

The purpose of this thesis was to check the motor cabling table and to make the selection table to meet the current installation requirements of Umicore Finland Oy. The operating principle of the frequency converter and selected motor cables suitable for inverters were studied in the thesis, taking into account installation methods, temperature conditions and length of the motor cables. In addition to this the motor cabinet output solutions were examined, as well as the implementation of protection.

The device manuals of the frequency converter manufacturers were utilized in the thesis. After selecting the frequency converter, measurements and calculations were performed and cables for motors were chosen based on these results.

As a result, a motor cabling table was created and verified. The table can be used when installing new motor cables from the frequency converter to electric motors in Umicore Finland Oy's production areas.

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

1	JOHDANTO.....	9
2	SÄHKÖNJAKELU TEHDASOLOSUHTEISSA.....	10
3	TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTTÖ .....	12
3.1	Taajuusmuuttajan toimintaperiaate .....	12
3.2	EMC taajuusmuuttajakäytössä.....	14
3.2.1	Häiriötyypit taajuusmuuttajassa.....	16
3.3	Harmoniset yliaallot.....	18
3.3.1	Yliaalloista johtuvia haittoja ja niiden aiheuttajat.....	19
3.4	Laakerivirrat.....	20
3.5	Moottorin ylijännitteet .....	22
3.5.1	du/dt-suodin .....	24
3.5.2	Sinisuodin.....	25
4	TAAJUUSMUUTTAJIEN TEKNISET TIEDOT .....	26
4.1	ABB ACS880.....	26
4.1.1	Seinäasennetut ACS880-taajuusmuuttajat .....	28
4.1.2	Suora momenttisäätö (DTC) .....	29
4.2	Vacon 100 .....	30
4.2.1	Seinäasennetut Vacon 100-taajuusmuuttajat.....	34
4.2.2	Kaappiasennetut Vacon 100-INDUSTRIAL taajuusmuuttajat... 35	
5	TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN KOMPONENTTIEN VALINTA JA MITOITUS.....	36
5.1	Kaapelin valitseminen.....	36
5.1.1	Yleistä asennuksista .....	36
5.1.2	Kaapelin kuormitettavuus .....	37
5.1.3	Kaapelin enimmäispituus jännitteenaleneman kannalta .....	40

5.2	Taajuusmuuttajan ja moottorin mitoitus kuormitettavuuden ja hetkellisen momenttitarpeen mukaan .....	42
5.2.1	Jatkuva S1-käyttö .....	43
5.3	Taajuusmuuttajan normaali ja raskas käyttö .....	45
5.3.1	Taajuusmuuttajan normaali käyttö .....	46
5.3.2	Taajuusmuuttajan raskas käyttötapa .....	47
5.4	Moottorikeskuksen kalustus .....	47
5.4.1	Ylikuormitussuojaus .....	48
5.4.2	Oikosulkusuojaus .....	48
5.4.3	Sulakkeilla toteutettu moottorilähtö .....	50
5.4.4	Sulakkeeton moottorilähtö .....	51
6	TAULUKOIDEN LAADINTA .....	53
6.1	Esimerkki moottorikaapeloinnin laskemisesta .....	53
6.2	Taajuusmuuttajalähdön komponenttien valinta .....	58
	LÄHTEET .....	59
	LIITTEET	

## KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<b>Kuva 1.</b> Tilaluokituksen määräytymisen esimerkki.	11
<b>Kuva 2.</b> PWM-taajuusmuuttajan rakenne.	12
<b>Kuva 3.</b> Pienitehoisen taajuusmuuttajan ottama virta syöttöverkosta.	13
<b>Kuva 4.</b> Moottorin jännite taajuusmuuttajakäytössä (50Hz).	14
<b>Kuva 5.</b> Moottorin virta taajuusmuuttajakäytössä (50Hz).	14
<b>Kuva 6.</b> EMC-käyttöympäristöt.	15
<b>Kuva 7.</b> Ilman suotimia toteutettu taajuusmuuttajalähtö.	16
<b>Kuva 8.</b> RFI/EMC-suotimella toteutettu taajuusmuuttajalähtö.	17
<b>Kuva 9.</b> Säteilevien häiriöiden vähentämiseen olevia ratkaisuja.	18
<b>Kuva 10.</b> Harmonisesta yliaallosta säröytynyt jännite.	19
<b>Kuva 11.</b> Rinnakkaisresonanssiipiiri.	20
<b>Kuva 12.</b> Laakerivirtojen syntyminen ja eteneminen yksinkertaisesti.	21
<b>Kuva 13.</b> Laakerin pinnassa näkyvää kuoppamaista kulumaa.	21
<b>Kuva 14.</b> Jännitepulssin suureneminen moottorilla.	23
<b>Kuva 15.</b> Jännitepulssin pieneminen moottorilla.	23
<b>Kuva 16.</b> Moottorin ylijännite ja sen vaimeneminen.	24
<b>Kuva 17.</b> FSO-12-turvatoimintomoduuli.	27
<b>Kuva 18.</b> ACS880-seinälle asennettavien taajuusmuuttajien tuoteperhe.	28
<b>Kuva 19.</b> Suoran momenttisäädön lohkokaavio.	30
<b>Kuva 20.</b> SS1-toiminnon periaatekuva.	31
<b>Kuva 21.</b> Seinäasennettavat Vacon 100-taajuusmuuttajat.	34
<b>Kuva 22.</b> Kaappiasennettu Vacon 100-INDUSTRIAL taajuusmuuttaja.	35
<b>Kuva 23.</b> Kuorman ottama momentti S1-käytössä.	44
<b>Kuva 24.</b> Taajuusmuuttajan normaali käyttötavan kuormitus- ja rajoituskäyrä.	46
<b>Kuva 25.</b> Taajuusmuuttajan raskaan käyttötavan kuormitus- ja rajoituskäyrä.	47
<b>Kuva 26.</b> Kahvasulakkeen toiminta oikosulun tapahtuessa.	49
<b>Kuva 27.</b> gG-kahvasulakkeiden virranrajoituskäyrä.	49
<b>Kuva 28.</b> Sysäyskertoimen määrittäminen oikosulkuvirtapiirin R/X suhteesta.	50
<b>Kuva 29.</b> gG-sulakkeiden toiminta-ajat.	51
<b>Kuva 30.</b> Moottorisuojakytkimen virta-/aikaominaiskäyrä.	52

<b>Taulukko 1.</b> Tilaluokituksen määräytyminen kaasu-ilmasuoksista.	10
<b>Taulukko 2.</b> Tilaluokituksen määräytyminen pöly-ilmasuoksista.	11
<b>Taulukko 3.</b> EMC-käyttöjen luokitus.	15
<b>Taulukko 4.</b> ACS880-01-taajuusmuuttajan suositellut sulakekoot.	28
<b>Taulukko 5.</b> ABB ACS880-seinäasennettujen taajuusmuuttajien tyyppitiedot.	29
<b>Taulukko 6.</b> Vacon 100-taajuusmuuttajien enimmäiskaapelipituudet.	32
<b>Taulukko 7.</b> Sulakkeettomat suojaukset Vacon 100-taajuusmuuttajaan.	32
<b>Taulukko 8.</b> Vacon 100-taajuusmuuttajan sulakekoot runkokoon mukaan.	33
<b>Taulukko 9.</b> Seinäasennettujen Vacon 100-taajuusmuuttajien tyyppitiedot.	34
<b>Taulukko 10.</b> Kaappiasennettujen Vacon 100-INDUSTRIAL tyyppitiedot.	35
<b>Taulukko 11.</b> Kaapeleiden eristeaineiden suurimmat käyttölämpötilat.	38
<b>Taulukko 12.</b> Työssä käytettävät korjauskertoimet.	38
<b>Taulukko 13.</b> Jännitealeneman hyväksytyt rajat julkisessa sähkönjakelussa.	40
<b>Taulukko 14.</b> Likimääräiset kaapelin resistanssi- ja reaktanssiarvot.	42
<b>Taulukko 15.</b> 1500 rpm oikosulkumoottoreiden tekniset tiedot.	54
<b>Taulukko 16.</b> Taajuusmuuttajalähdön komponentit 15 kW moottorille.	58
<b>Taulukko 17.</b> Monijohdinkaapeleiden korjauskertoimet asennustavoittain.	63
<b>Taulukko 18.</b> Kaapelien korjauskertoimet kaapelin eristeaineen mukaan.	63
<b>Taulukko 19.</b> Prysmian Groupin MCCMK-kaapeleiden tekniset tiedot.	64
<b>Taulukko 20.</b> Prysmian Groupin AMCMK- ja AXCCMK-kaapeleiden tekniset tiedot.	65

**LIITELUETTELO**

**LIITE 1.** Liite poistettu tilaajan pyynnöstä.

**LIITE 2.** Kaapeleiden tekniset tiedot.



## 1 JOHDANTO

Umicore Finland Oy on akkumateriaaleja tuottava yritys, joka tarjoaa tulevaisuuden ratkaisuja nykypäivän maailmanlaajuisiin haasteisiin. Umicore Finland Oy:n tuotteita käytetään muun muassa mobiililaitteiden ja sähköautojen akuissa, sillä valmistettavat materiaalit parantavat akkujen kestoa, ladattavuutta sekä laatua. Kokkolassa sijaitsevan tehtaan toiminta on alkanut jo vuonna 1968 ja tehdas työllistää tällä hetkellä noin 260 henkilöä.

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Umicore Finland Oy:lle tämän päivän standardeihin perustuva moottorikaapelointitaulukko, josta voidaan helposti ja nopeasti katsoa vaadittava moottorikaapeli taajuusmuuttajan ja moottorin välille. Työssä tehdään laskuesimerkki, jota hyödyntämällä pystytään mitoittamaan moottorikaapeli erikokoisille moottorintehoille.

Tässä opinnäytetyössä laadittua moottorikaapelointitaulukkoa voidaan käyttää Umicore Finland Oy:n tuotantotiloissa. Moottorikaapelointitaulukosta pystytään katsomaan moottorintehon mukaan tarvittava taajuusmuuttaja, kaapelin tyyppi, kaapelin poikkipinta-ala, suojalaitteet, moottorikaapelin enimmäispituus jännitteenalenneman kannalta ja muut tarvittavat komponentit moottorilähtöön. Suojalaitteet ovat yleensä taajuusmuuttajavalmistajan ohjeiden mukaisia, sillä näin voidaan taata taajuusmuuttajan varma toiminta. Moottorikaapelointitaulukko nopeuttaa varsinkin sähkösuunnittelijoiden työskentelyä, sillä taulukosta voidaan katsoa nopeasti kuhunkin moottorilähtöön vaadittavat komponentit tehon mukaan.

Taajuusmuuttajien avulla saavutetaan erittäin hyvät säätömahdollisuudet, joiden avulla tuotannossa olevia prosessilaitteita voidaan ajaa aina sen hetkisten tarpeiden mukaisella nopeudella, joka on helposti muutettavissa. Taajuusmuuttajat aiheuttavat myös ongelmia, joita ovat muun muassa erilaiset häiriöt. Näitä häiriöitä pystytään vähentämään oikeanlaisella asennustavalla sekä erilaisilla suotimilla.

Opinnäytetyö toteutettiin tämän päivän standardeissa olevien vaatimusten perusteella, joissa otettiin huomioon työympäristössä esiintyvät ja asennustavoista johdettavat korjauskertoimet, jotka vaikuttavat suoraan kaapelin valintaan.

## 2 SÄHKÖNJAKELU TEHDASOLOSUHTEISSA

Umicore Finland Oy:n tehdasolosuhteissa sähkönjakelu tehtaan sisällä on hankalaa keskuksilta prosessilaitteille. Tämän takia on tehtävä suunnitelmat valmiiksi jo siinä vaiheessa, kun valitaan tarvittavia komponentteja, kaapeleita sekä prosessilaitteita tuotantotiloihin. Tuotantotiloissa olevista laitteista ja komponenteista on otettava huomioon monia asioita, kuten laitteiden suojausluokitukset. Tehdasolosuhteet koostuvat erilaisista tiloista. Tiloissa voi esiintyä muun muassa seuraavanlaisia ongelmia: tuotantotilojen lämpötilat, pölyisyys, heilumiset/tärinät, räjähdysvaaralliset tilat, vaaralliset kemikaalit, märät/kosteat tilat ym. Tämän takia sähkökeskukset ja taajuusmuuttajat, jotka syöttävät prosessilaitteita, sijoitetaan omaan varattuun tilaansa. Tämä tila on ilmastoitu, jolla varmennetaan, etteivät laitteet tuottaisi katkoksia prosesseihin lämmöstä johtuvien häiriöiden takia. Näin laitteet saadaan myös samalla suojattua edellä mainituilta ongelmilta.

Näihin ja muihin ongelmiin on mietittävä sopivat ratkaisut etukäteen. Kentällä tulevista laitteista on löydyttävä olosuhteet huomioiden muun muassa riittävät IP-luokitukset sekä jos kyseessä on räjähdysvaarallinen tila, niin riittävä ATEX-luokitus. ATEX-luokitus on katsottava tapauskohtaisesti, sillä yhtenä kriteerinä laitteita valittaessa on tiedettävä, esiintyykö asennettavassa tilassa esimerkiksi mahdollisesti räjähdysvaarallista ilmaseosta. Mikäli ilmaseosta esiintyy, on myös tiedettävä, kuinka useasti tätä ilmenee kyseisessä tilassa. Jos ilmassa esiintyy palavan aineen muodostamaa räjähdyskelpoista ilmaseosta jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein kuuluu tämä vaativampaan tilaluokkaan 0. Tilaluokitukset on jaettu vielä erikseen kaasu-ilmaseoksista sekä pöly-ilmaseoksista johtuviin tilaluokituksiin, jotka ovat nähtävissä taulukoissa 1 ja 2.

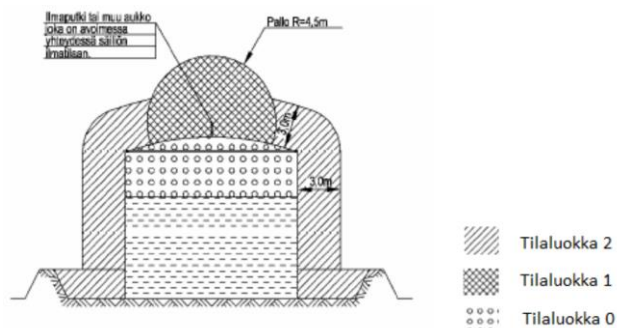
**Taulukko 1.** Tilaluokituksen määräytyminen kaasu-ilmaseoksista. /1/

TILALUOKKA	MÄÄRITELMÄ
Tilaluokka 0	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>jatkuvasti, pitkäaikaisesti tai usein.</b>
Tilaluokka 1	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>normaalitoiminnassa satunnaisesti.</b>
Tilaluokka 2	Tila, jossa ilman ja kaasun muodossa olevan palavan aineen muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen <b>normaalioloissa on epätodennäköistä ja se kestää vain lyhyen ajan.</b>

**Taulukko 2.** Tilaluokituksen määräytyminen pöly-ilmaseoksista. /1/

TILALUOKKA	MÄÄRITELMÄ
Tilaluokka 20	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>jatkuvasti, pitkäaikaisesti ja usein</b>
Tilaluokka 21	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostama räjähdyskelpoinen ilmaseos esiintyy <b>normaalitoiminnassa satunnaisesti.</b>
Tilaluokka 22	Tila, jossa ilman ja palavan pölyn muodostaman räjähdyskelpoisen ilmaseoksen esiintyminen <b>normaalioloissa on epätodennäköistä ja se kestää vain lyhyen ajan.</b>

Esimerkkinä voidaan ottaa kuvan 1 kaltainen tilanne, jossa ilmaseoksista voisi aiheutua räjähdysvaara. Säiliön sisällä on räjähdysvaarallista ainetta jatkuvasti, jolloin tämä voidaan tämän perusteella olevan jo tilaluokkaan 0 kuuluva alue. Laitte voi päästää satunnaisesti siinä sijaitsevasta ilmaputkesta höyryjä, jolloin voidaan ilmaputken läheisyydessä oleva alue luokitella tilaluokkaan 1. Normaalisti olosuhteissa höyryt eivät kulkeudu säiliön reunoja pitkin alas ja mikäli näin kävisi, esiintyy näitä vain harvoin. Tämän takia säiliön ympärillä oleva vaatimustaso voidaan luokitella tilaluokkaan 2. Kokonaisuutena tila voidaan näin ollen luokitella räjähdysvaaralliseksi ja tänne valittavat laitteet on oltava Ex-laitteita. /1/

**Kuva 1.** Tilaluokituksen määräytymisen esimerkki. /1/

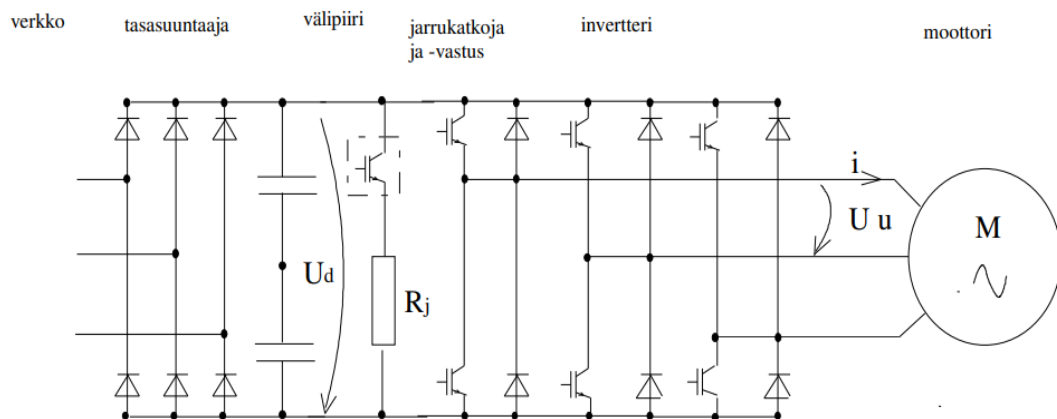
Kaikki kaapelit kulkevat yleisesti hyllyjä pitkin, joten niiden on oltava HST-suojattuja eli haponkestäviä, tuotantotiloissa mahdollisten roiskuvien/tippuvien kemikaalien varalta. Teollisuudessa tärkeässä roolissa on myös prosessilaitteiden sekä sähkönjakelun luotettavuus. Mikäli sähkönjakelussa ilmenisi katkoja prosessilaitteiden tai sähkönjakelun takia, toisi nämä suuren tappion rahallisesti tuotannon pysähtymisessä olemisen takia /31/. Tämän takia ennakko- ja huoltotyöt ovat tärkeässä roolissa, jotta pystytään parantamaan entisestään prosessilaitteiden luotettavuutta.

### 3 TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTTÖ

Tässä kohdassa tutustutaan taajuusmuuttajakäyttöihin. Tarkastellaan taajuusmuuttajan toimintaperiaatetta sekä tämän tuottamia häiriöitä ja niiden vähentämistä.

#### 3.1 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Yleisin taajuusmuuttajan rakenne on esitetty kuvassa 2. Tässä kolmivaiheisesta (400V, 50Hz) syöttöverkosta syötetään kuusipulssisen tasasuuntaajan ja välipiirin kautta kolmivaiheista PWM-ohjattua taajuusmuuttajaa. PWM-tekniikalla moottorille syötettävän jännitteen tehollisarvoa säädetään jännitepulssin leveyttä muuttamalla. Taajuusmuuttajan perään on kytketty tyypillinen kolmivaiheinen oikosulkumoottori, jonka pyörimisnopeutta halutaan ohjata. /7/



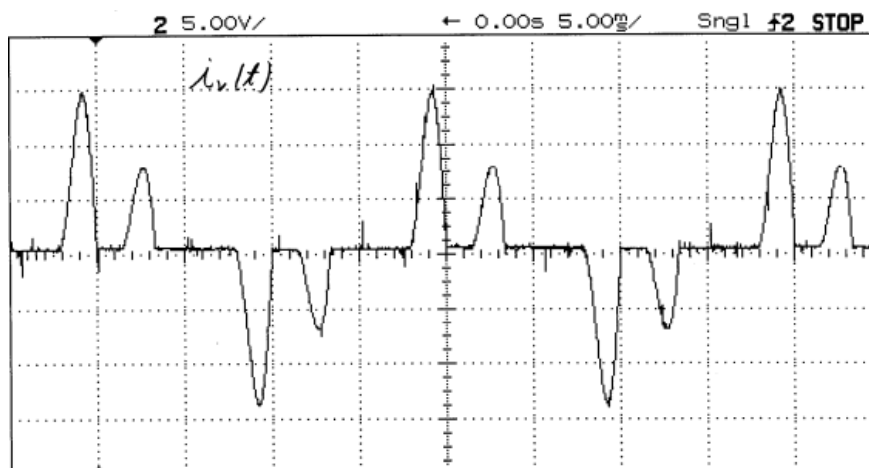
**Kuva 2.** PWM-Taajuusmuuttajan rakenne. /13/

Taajuusmuuttajan toimintaperiaate kuvasta 2 kerrottuna on lyhyesti seuraavanlainen: sähköverkosta syötetään taajuusmuuttajaan sinimuotoista vaihtojännitettä, joka tasasuunnataan diodisillan avulla tasajännitteeksi. Tämä tasajännite suodatetaan vielä välipiirissä olevien kondensaattoreiden avulla, jotka tasoittavat tasajännitettä sekä toimivat samalla energiavarastona. Tämän jälkeen taajuusmuuttajassa sijaitsevilla IGBT-transistoreilla toteutetaan kolmivaiheinen vaihtosuuntaussilta, jolla voidaan muuttaa suodatettu tasajännite halutun taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Tämä vaihtojännite syötetään lopuksi ohjattavalle moottorille. /7/

Edellä mainittu IGBT-transistori on yleisessä käytössä taajuusmuuttajakäytössä, sillä kyseinen transistori on tarkoitettu varsinkin kytkinkäyttöön. IGBT-transistorilla on monta hyvää ominaisuutta, joita ovat esimerkiksi suuren jännitteen kesto

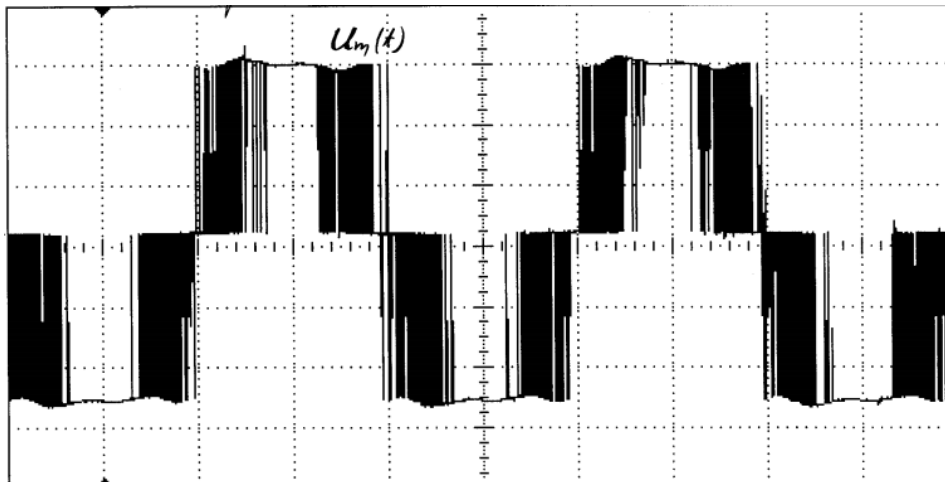
auki-tilassa sekä suuren virran kesto johtavassa tilassa. Silloin kun IGBT-transistori on johtavassa tilassa, on jännitehäviöt transistorin yli pienet. Tästä seuraa myös, että komponentissa esiintyy pieniä tehohäviöitä, jolloin IGBT-transistori voidaan koteloida tiiviisti, eikä tarvita suuritehoista jäähdytystä. /7, 12/

Kun puhutaan taajuusmuuttajan ottamasta verkkovirrasta, voidaan ensimmäiseksi ajatella sen oletetusti olevan täysin sinimuotoista, mutta asia ei kuitenkaan ole näin. Kuormitetun taajuusmuuttajan ottama virta on yleisesti ei-sinimuotoista, eli verkkovirrassa esiintyvä yliaaltopitoisuus on suuri. Taajuusmuuttajan diodisilta sekä kondensaattori aiheuttavat verkosta ottavan virran ei-sinimäisyyden. Kondensaattori aiheuttaa syöttävään verkkovirtaan taajuusmuuttajalle tyypillistä pulssimaisuutta, jota ei esiinny enää kondensaattorin jälkeen. Tämän takia taajuusmuuttajan välipiirissä virta ei ole tasavirran muotoista. Kuvassa 3 on pienen taajuusmuuttajan ottama verkkovirta pienellä kuormalla. /7/

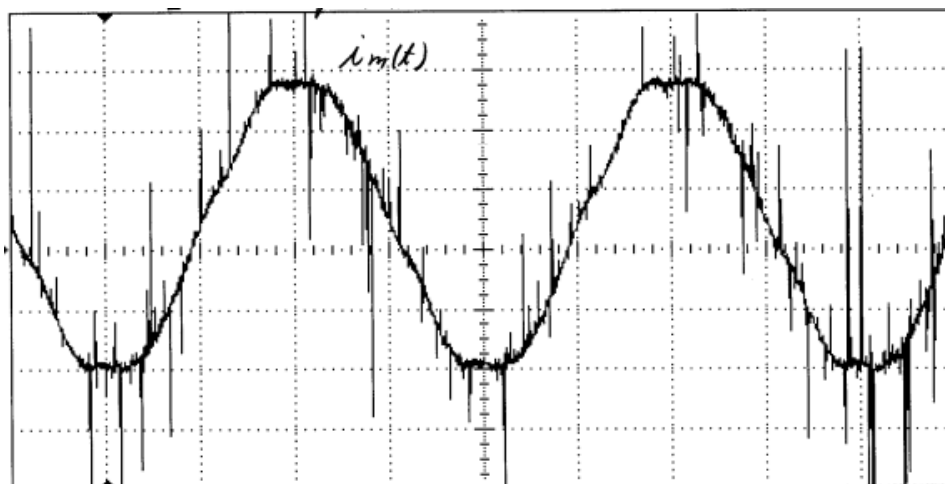


**Kuva 3.** Pienitehoisen taajuusmuuttajan ottama virta syöttöverkosta. /7/

Moottorin pääjännite muodostuu taajuusmuuttajan välipiirin tasajännitteestä, jolloin taajuusmuuttaja kytkee vuorotellen moottorin kunkin navan tasajännitepiiriin + tai - kiskoon. Pääjännite on siis aina jokin seuraavista vaihtoehdoista:  $+U_d$ ,  $-U_d$  tai nolla. Nämä voidaan jakaa kolmeen eri portaaseen, jota voidaan tarkastella moottorin jännitteen kuvasta 4. Nolla esiintyy silloin, kun moottorin navat ovat kytkettyinä samaan kiskoon. Kuvissa 4 ja 5 nähdään moottorin jännitteen ja virran aika-funktiot, kun taajuus on 50Hz. Kuvasta 5 voidaan huomata, että puolestaan moottorin ottama virta on lähes täydellisesti sinimuotoista. /7/



**Kuva 4.** Moottorin jännite taajuusmuuttajakäytössä (50Hz). /7/



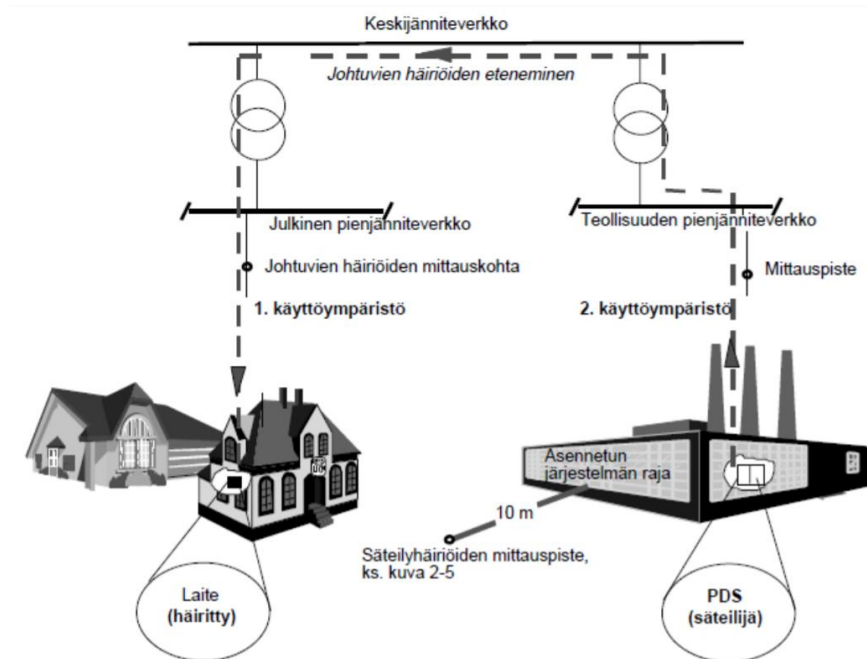
**Kuva 5.** Moottorin virta taajuusmuuttajakäytössä (50Hz). /7/

### 3.2 EMC taajuusmuuttajakäytössä

EMC-käytön tarkoitus on taata sähkö- ja elektroniikkalaitteiden toiminta ilman, että niihin kohdistuu häiriötä siinä ympäristössä, jossa laitetta on tarkoitus käyttää (häiriönsieto). Tämän lisäksi sähkö- ja elektroniikkalaite ei saa altistaa muita ympärillä tai lähistöllä olevia laitteita sähkömagneettisilla häiriöillä (häiriöpäästöt). /10/

Käyttöympäristöt EMC:n kannalta on jaettu kahteen eri käyttöympäristöön, jotka ovat nähtävissä kuvassa 6. Ensimmäiseen ympäristöön eli kaupalliseen käyttöympäristöön kuuluvat rakennukset, jotka on liitetty suoraan ilman välimuuntajia pienjänniteverkkoihin. Esimerkkejä näistä ovat asuintalot, toimistot ja liikehuoneistot.

Toinen käyttöympäristö eli teollinen ympäristö, johon kuuluu puolestaan kaikki muut laitokset, jotka on liitetty pienjänniteverkkoon. Taulukosta 3 nähdään eri käyttöluokkien vaatimukset. /5, 10/



**Kuva 6.** EMC-Käyttöympäristöt. /10/

**Taulukko 3.** EMC-käyttöjen luokitus.

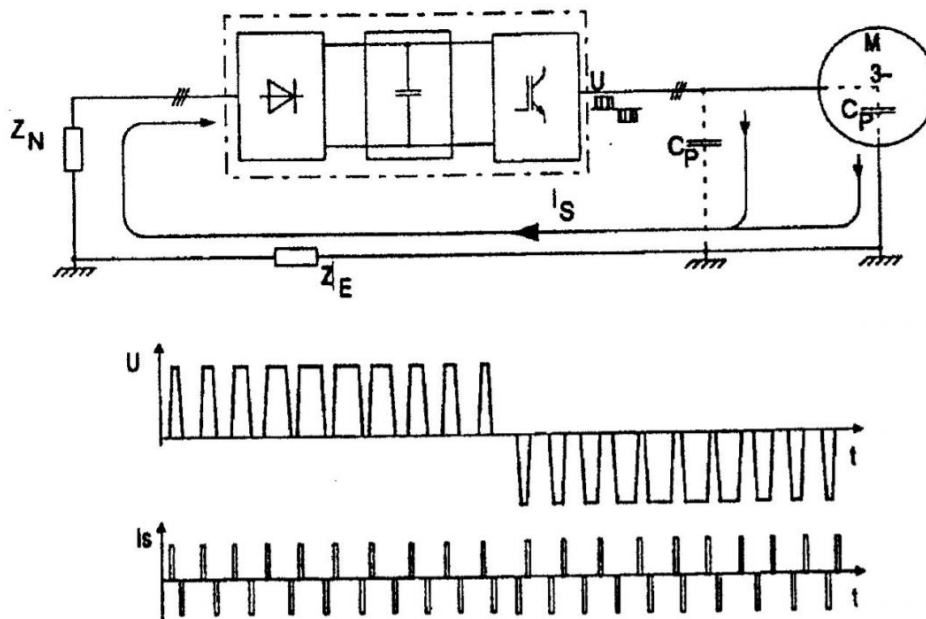
Luokka	Käyttöluokkien kuvaus
C1	Nimellisjännite alle 1000V. Suunniteltu käyttö ensimmäiseen ympäristöön.
C2	Nimellisjännite alle 1000V. Laitte ei ole tulppaliitännäinen, eikä siirrettävä. Jos aiotaan käyttää ensimmäisessä ympäristössä, asennus vaatii ammattihenkilön.
C3	Nimellisjännite alle 1000V. Asennuskohteena ainoastaan toinen ympäristö.
C4	Nimellisjännite tai -virta vähintään 1000V / 400A tai tarkoitettu monimutkaisissa järjestelmissä toisessa asennusympäristössä.

Teollisuudessa, ja varsinkin tässä työssä, tarkasteltavassa ympäristössä vaatimustaso on tyypillisesti luokassa C3. Vaatimustasoa ajateltaessa voitaisiin luulla ensimmäiseksi, että teollisuudessa olisi EMC-vaatimukset vaativammat kuin asuintiloissa, mutta näin ei asia kuitenkaan ole. Vaativimmat vaatimustasot saavutetaankin ensimmäisessä käyttöympäristössä luokissa C1 – C2.

### 3.2.1 Häiriötyypit taajuusmuuttajassa

Taajuusmuuttajakäytöissä esiintyy pääasiassa kahdenlaisia häiriöpäästöjä. Nämä kaksi keskeisintä häiriöpäästöä voidaan jaotella erikseen kahteen eri luokkaan: johtuviin häiriöihin ja säteileviin häiriöihin.

Johtuvia häiriöitä esiintyy syöttökaapelien ja maadoitusten kautta. Näitä suuritaajuisia häiriöitä syntyy, sillä taajuusmuuttajassa sijaitsevien IGBT-kytkinten suurien ja nopeiden virran- ja jännitteenkytkentämuutoksien aikana aiheutuu nopeasti nousevia pulsseja, jotka kulkevat moottorin ja kaapelin hajakapasitanssien kautta maahan. Kuvassa 7 käy ilmi taajuusmuuttajalähtö, jossa ei ole käytössä EMC/RFI-suodinta. Samaisesta kuvasta nähdään myös johtuvien häiriöiden ja kytkentätaajuuden välinen riippuvuus, joka vaikuttaa suoraan moottorikaapelin enimmäispituuteen. Taajuusmuuttajavalmistajat kertovat erikseen onko kytkentätaajuutta rajoittamalla mahdollista saada moottorikaapelin enimmäispituutta kasvatettua.

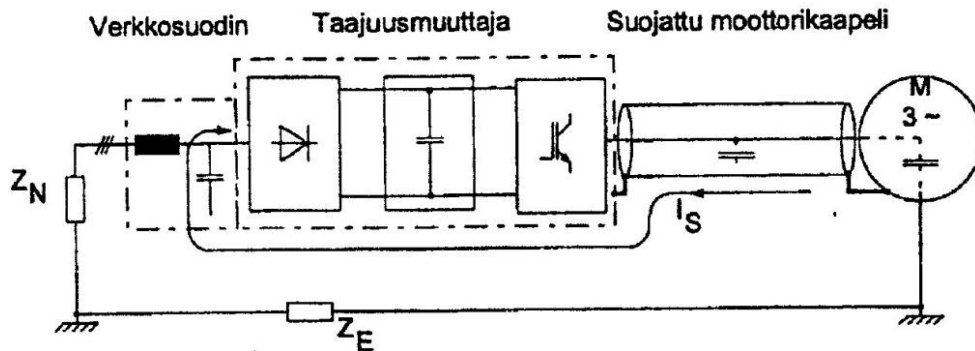


**Kuva 7.** Ilman suotimia toteutettu taajuusmuuttajalähtö. /10/

Johtuvia häiriöitä pystytään pienentämään muun muassa RFI/EMC-suotimella. Kun käytössä on RFI/EMC-suodin, saadaan esiintyvälle häiriövirralle vaaraton kulureitti, eikä se tällöin lähde kiertämään maadoituksissa tai syöttöverkossa. Kun lisäksi käytössä on EMC-suojatut moottorikaapelit, saadaan häiriövirroille



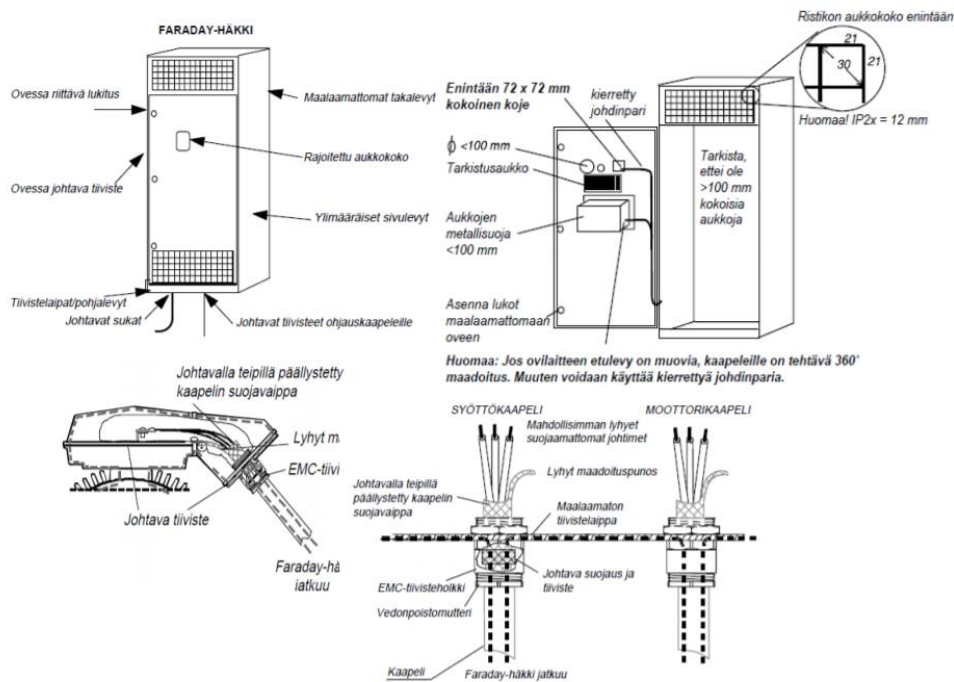
paluureitti takaisin taajuusmuuttajaan. Kuvassa 8 on RFI/EMC-suotimella toteutettu taajuusmuuttajalähtö, jossa häiriövirta johdatetaan takaisin taajuusmuuttajaan vaarattomasti. /10/



**Kuva 8.** RFI/EMC-suotimella toteutettu taajuusmuuttajalähtö. /10/

Säteilevillä häiriöillä tarkoitetaan ilman kautta eteneviä häiriöitä. Näitä häiriöitä syntyy puolijohdekytkimien toiminnan lisäksi, myös ohjauspiirien toiminnan lisäksi muun muassa teholähteistä. Nopeat kytkentäilmiöt voivat tehdä moottorikaapeloinnistaan itselleen antennin, joka säteilee häiriötä ympärilleen. /10/

Säteileviä häiriöitä voidaan pienentää koteloiden, kaapeleiden ja maadoitusten avulla. Moottorikaapeleiden ollessa suojattuja ja joiden suojavaippa on maadoitettu taajuusmuuttajalta sekä moottorilta 360 asteisesti, taataan häiriöiden pysyminen kaapeleiden vaipan sisällä. Tämän lisäksi moottorikaapeli pitää olla jatkuva taajuusmuuttajalta moottorille saakka. Turvakytkimet ovat yleensä materiaaliltaan metallisia tai muovista tehtyjä EMC-suojattuja turvakytkimiä, jolloin häiriöt saadaan pidettyä koteloinnin sisällä. Kun maadoitetaan tehokkaasti taajuusmuuttaja, kojeistokaappi sekä moottori, saadaan kaikkia näitä neuvoja käyttämällä aikaan niin sanottu Faradayn-häkki, jolla saadaan häiriöitä vähennettyä. Kuvassa 9 on näkyvillä, kuinka säteileviä häiriöitä saadaan vähennettyä sekä osittain myös estettyä. /5, 10/



**Kuva 9.** Säteilevien häiriöiden vähentämiseen olevia ratkaisuja. /10/

### 3.3 Harmoniset yliaallot

Verkkovirrassa esiintyy harmonisia yliaalloja, jotka jakautuvat vielä jännite- ja virtayliaaltoihin. Harmoniset jänniteyliaallot johtuvat ylivirta-aaltojen aiheuttamasta jännitehäviöstä syöttävässä verkossa. Verkkosuuntaajat aiheuttavat harmonisia yliaalloja, joita voidaan tarkastella yliaaltojen seuraavilla yhtälöillä 1 ja 2. Yhtälöillä voidaan tarkastella aallon järjestysluku sekä tehollisarvoa. /14/

$$n = p * i \pm 1, \text{ jossa} \quad (1)$$

$n$  = aallon järjestysluku (taajuus  $n * 50\text{Hz}$ ).

$p$  = pulssiluku

$i$  = kokonaisluku (0, 1, 2, 3, ...).

$$I_{VN} = \frac{I_{V1}}{n}, \text{ jossa} \quad (2)$$

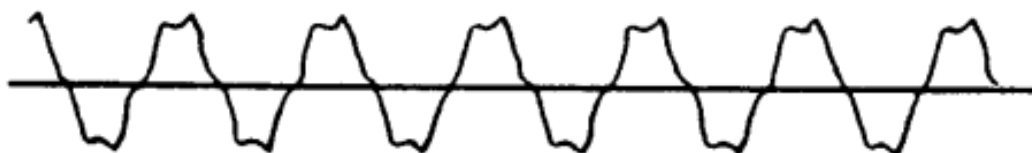
$I_{VN}$  = virran  $n$ . aallon tehollisarvo

$I_{V1}$  = virran perusaallon tehollisarvo

$n$  = aallon järjestysluku (taajuus  $n * 50\text{Hz}$ ).

Luvussa 3 tutustuttiin taajuusmuuttajan toimintaperiaatteeseen sekä siellä sijaitsevaan 6- pulssisillan. Tämän pulssisillan ja taajuusmuuttajan välinen välipiirin virta ei ole lähimainkaan tasaista. Tämän takia yliaaltovirtojen tehollisarvot eivät tarkoin noudata yllä olevia yhtälöitä, kun käytössä on työn mukaiset taajuusmuuttaja ja oikosulkumoottori. Yliaaltoja voidaan kuitenkin laskea mainituilla yhtälöillä, sillä tiedetään yliaaltojen järjestyslukujen olevan 5., 7., 11., 13., ... jotka vastaavat taajuutena 250Hz, 350Hz, 550Hz, 650Hz... /14/

Vaihtojännitteessä esiintyy kuvan 10 kaltaista jännitteen säröytymistä. Kuvasta voidaan nähdä, että kun kyseessä on harmoninen yliaalto, sillä jakso toistuu aina samansuuruisena, vaikka tämä ei täysin sinimuotoista jännitettä olekaan. /14, 15, 16/



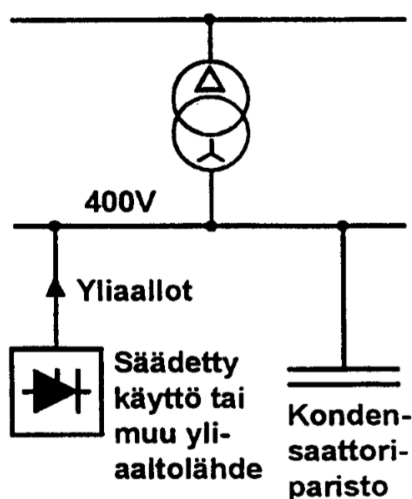
**Kuva 10.** Harmonisesta yliaallosta säröytynyt jännite. /16/

### 3.3.1 Yliaalloista johtuvia haittoja ja niiden aiheuttajat

Kaikki elektroniikka sisältävät laitteet ottavat epäsinimäistä virtaa. Teollisuudessa yliaaltojen pahimpia aiheuttajia ovat suuntaajakäytöt eli muun muassa taajuusmuuttajat. Tämän lisäksi muita teollisuusympäristössä esiintyviä yliaaltojen aiheuttajia ovat elektroniikka, purkauslamput ja loistelamput, hitsauslaitteet ja UPS-laitteet.

Taajuusmuuttaja ottaa verkosta usein yliaaltopitoista virtaa, joka huomataan jo luvun 3.1 kuvasta 3. Taajuusmuuttaja syöttää tämän seurauksena myös syöttöverkoon päin harmonisia yliaaltoja, josta seuraa johtuvia haittoja, joita ovat muun muassa lisähäviöiden kasvaminen eri verkon osissa, kuten moottoreissa. Moottoreissa tämä tarkoittaa hyötysuhteen laskemista sekä eliniän lyhenemistä. Samalla myös kaapeleissa ilmenee kasvavaa virtalämpö-, pyörrevirta- ja hystereesihäviöitä. /14, 15, 17/

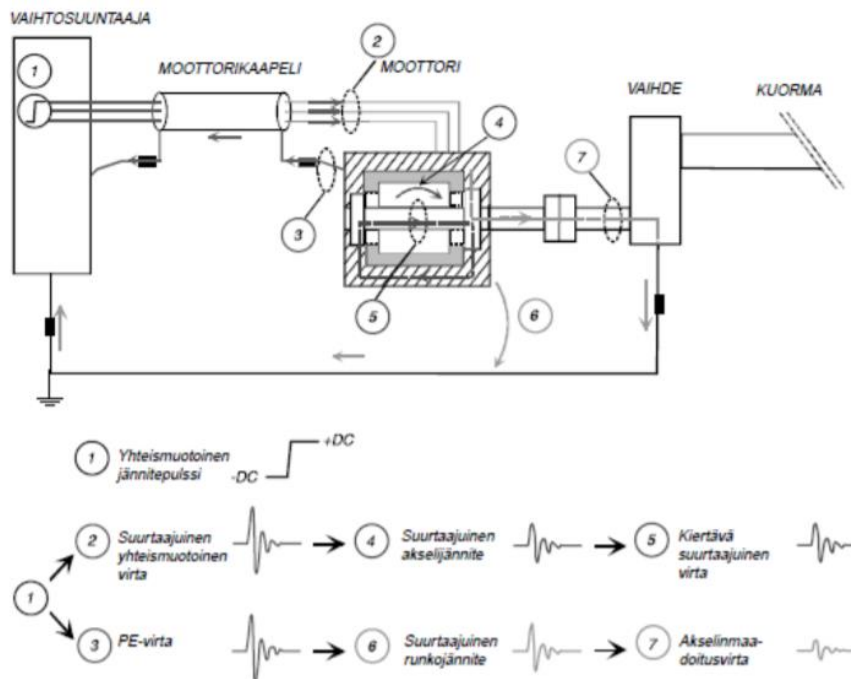
Teollisuusverkossa ilmenee myös sarja- ja rinnakkaisresonanssitilanteita. Näitä resonansseja syntyy, kun yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta. Käytännössä rinnakkaisresonanssi on näistä kahdesta tapauksesta vaarallisempi. Kuvassa 11 on esitetty rinnakkaisresonanssipiiri. Rinnakkaisresonanssi- ja yliaaltoja aiheuttava yliaalltolähde generoi yliaaltovirtoja pienjänniteverkkoon, jotka voivat vahvistua jopa 10 - 15 kertaiseksi kondensaattoreiden ja verkon induktanssin muodostamassa rinnakkaisresonanssi- ja yliaalto- ja yliaaltovirtapiirissä. Näitä resonansseja voidaan ehkäistä käyttämällä syöttöverkossa imupiirejä tai estokelaparistoja. Mahdollisuus on myös muuttaa kondensaattorien kokoa, jolloin yliaaltokomponentti ei vahvistuisi radikaalisesti. /14/



**Kuva 11.** Rinnakkaisresonanssi- ja yliaalto- ja yliaaltovirtapiiri. /14/

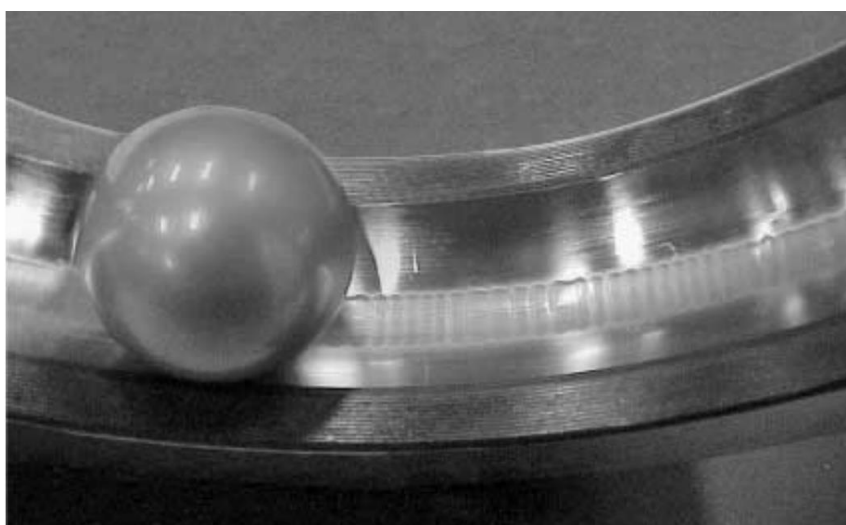
### 3.4 Laakerivirrat

Laakerivirtoja esiintyy sähkömoottorin sekä taajuusmuuttajan välillä. Taajuusmuuttajassa sijaitsevat IGBT-puolijohdekytkimet aiheuttavat nopeiden kytkentätaajuuksien sekä nopeasti nousevan jännitepulssinsa takia ongelmia sähkömoottorille. Kuvassa 12 on esitetty laakerivirtojen synty sekä laakerivirtojen kulureitti yksinkertaisesti. Taajuusmuuttajakäytössä esiintyviä suurtaajuisia laakerivirtoja syntyy moottorille yhteismuotoisesta jännitteestä. Nopeasti nouseva yhteismuotoinen jännitepulssi aiheuttaa suuritaajuisen virtapulssin moottorille, jossa virtapulssit yrittävät sulkeutua esimerkiksi sähkömoottorissa sijaitsevien laakereiden kautta.



**Kuva 12.** Laakerivirtojen syntyminen ja eteneminen yksinkertaisesti. /10/

Laakerivirrat voivat aiheuttaa kahdentyyppistä kulumista sähkömoottorin laakereissa. Sähkömoottorin laakereihin voi kulua joko kuvan 13 kaltaisia kuoppia, joita ilmenee varsinkin, jos moottorin nopeus pysyy pääsääntöisesti vakiona. Tällöin virtapulsit ilmenevät koko ajan tietyillä jakson hetkillä. Jos puolestaan sähkömoottorin pyörimisnopeutta vaihdellaan, ei ilmene samanlaisia kuoppia, mutta tällöin laakerissa sijaitsevien kuulien ura voi syöpyä. /9, 10/



**Kuva 13.** Laakerin pinnassa näkyvää kuoppamaista kulumaa. /9/

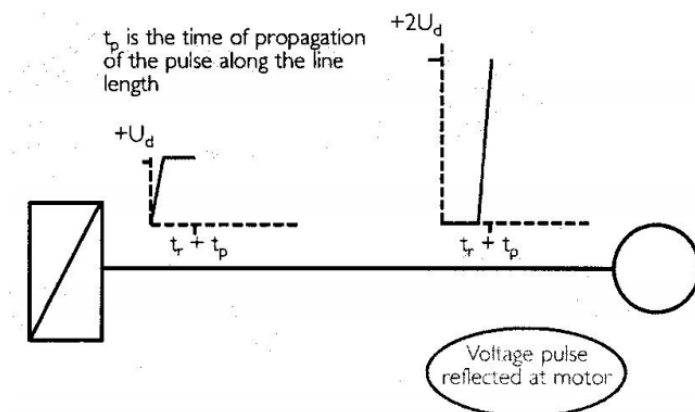
Laakerivirtoja ei pystytä täysin estämään taajuusmuuttajakäytöissä. Laakerivirtoja voidaan pienentää muutamalla keinolla, joita ovat: tehokkaampi maadoitus, lähtökuristimet ja laakereiden eristäminen. Tehokkaammalla maadoituksella tarkoitetaan sähkömoottorin rungon maadoittamista, jota pystytään parantamaan, kun käytössä on kaapelit, joiden impedanssiarvot ovat alhaisia. Tämän lisäksi kaapelin on syytä olla EMC-suojattu, jolloin saadaan sähkömoottorille hyvä säteilysuoja. Lähtökuristimilla pystytään pienentämään moottorijännitteessä ilmeneviä  $du/dt$ -arvoja. Näiden avulla saadaan lähtöjännitteestä korkeimmat taajuudet häviämään. Taajuusmuuttajiin saatavia lähtösuodattimia käsitellään luvussa 3.5. /9, 10/

### 3.5 Moottorin ylijännitteet

Moottorissa ylijännitteitä taajuusmuuttajakäytössä ilmenee enimmäkseen silloin, kun kyseessä on pitkiä moottorikaapeleita. Kun sähkömoottoria ohjataan taajuusmuuttajalla, jännite muodostuu moottorille taajuusmuuttajan nopeasti nousevista jännitepulsseista, kuten edellisissä kappaleissa on käynyt ilmi. Jännitepulsseja käsitellessä kulkuaaltona on huomioitava jännitepulssin heijastuminen ja kulkuaika. Kun tuleva ja heijastuva pulssi summautuvat syntyy ylijännite. Heijastumisen takia sähkömoottorissa ja taajuusmuuttajassa esiintyy tietyissä tapauksissa ylijännitteitä sähkömoottorille, jotka saattavat vahingoittaa tämän eristystä. Taajuusmuuttajakäytössä tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta moottorin napojen väliseen tai vaiheen ja maan väliseen jännitteeseen, vaan ainoastaan moottorin käämin jännitteeseen. /10/

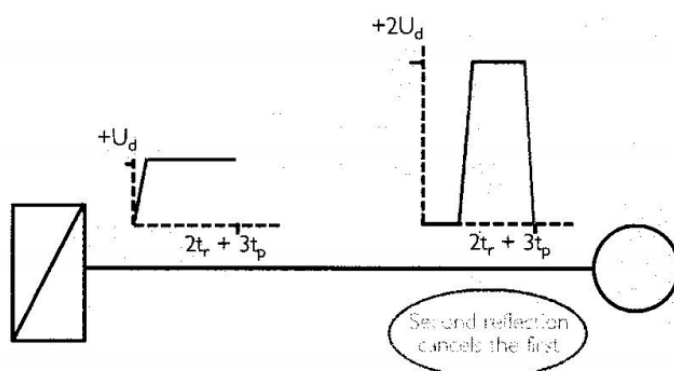
Jännitepulssi etenee moottorikaapelissa tietyllä nopeudella. Tällä hetkellä yleisessä käytössä olevan PVC-eristeyksen moottorikaapelin jännitepulssin kulkunopeus on tyypillisesti  $1,7 \times 10^8$  m/s. Kun tarkastellaan ylijännitteiden syntymistä, pitäisi teoriassa tietää myös taajuusmuuttajan tarkka jännitteen nousuaika. Tässä lyhyessä esimerkissä voidaan olettaa tämän olevan 100 nanosekuntia. Näillä tiedoilla voimme saada selville, että jännitepulssi kulkee PVC-eristetyssä moottorikaapelissa noin 17 metriä 100 nanosekunnissa. Näillä tiedoilla voidaan todeta, että yli 8,5 m moottorikaapeleilla ylijännitteitä alkaa muodostumaan. /10/

Käydään läpi lyhyt yksinkertaistettu tilanne äskeisen esimerkin mukaan. Kun taajuusmuuttajalta lähtevä ensimmäinen jännitepulssi saavuttaa  $+U_d$  arvon, ei tämä ole ehtinyt vielä moottorille. Jännitepulssin saapuessa moottorille, heijastuu tämä takaisin taajuusmuuttajalle, mutta moottorin impedanssin ollessa suuri kaapeliin verrattuna, nousee jännitepulssi huomattavalla jyrkkyydellä kuvan 14 kaltaisesti.



**Kuva 14.** Jännitepulssin suureneminen moottorilla. /10/

Kun jännitepulssi on ehtinyt takaisin taajuusmuuttajalle, heijastuu pulssi vastakkaismerkkisenä. Tämä tarkoittaa sitä, että taajuusmuuttajalla arvo  $U_d$  pysyy edelleen positiivisena, sillä moottorilta takaisin tuleva- ja heijastuva pulssi kumoavat toisensa. Tämän jälkeen taajuusmuuttajalta lähtenyt vastakkaismerkkisenä heijastunut pulssi  $-U_d$  saapuu moottorille, jossa se heijastuu takaisin samanmerkkisenä, aiheuttaen huomattavalla jyrkkyydellä jännitepulssin laskemisen nolnaan kuvan 15 kaltaisesti.

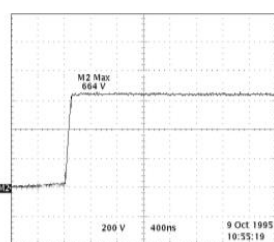


**Kuva 15.** Jännitepulssin pieneminen moottorilla. /10/

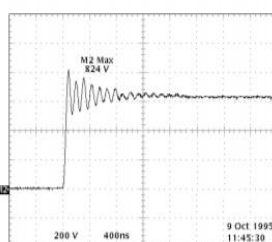
Tästä yksinkertaistetusta tilanteesta voidaan päätellä, että ylijänniteongelmia esiintyy varsinkin todella pitkillä kaapelivedoilla. Tällöin taajuusmuuttajalta takaisin

heijastuvat negatiiviset jännitepulssit eivät ehdi leikkaamaan moottorin päässä esiintyvää jännitettä. /10/

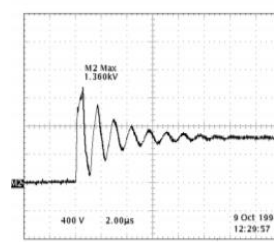
Kuvan 16 mukainen tapahtuma esiintyy jokaisen jännitepulssin yhteydessä. Pulssin leveyteen verrattuna ylijännitteen nousuaika on silti lyhyt, joka osoittaa sen, että ylijännite näkyy vain pulssin alussa. Tässä todellisesta mitatusta jännitteestä nähdään ensimmäisenä jännitteen vaihtelu, jonka jälkeen jännite tasoittuu eli vaimenee. Kuvasta myös nähdään, että tässä tapauksessa jo 4 metrin mittaisella moottorikaapeloinnilla ilmenee selvästi ylijännitettä.



a) Cable length = 0.5 m



b) Cable length = 4 m



c) Cable length = 42 m  
(Note change of scales)

**Kuva 16.** Moottorin ylijännite ja sen vaimeneminen. /32/

Ylijännitteitä varten taajuusmuuttajavalmistajilta on saatavilla erilaisia lähtösuotimia, joilla pystytään vaikuttamaan moottorin ylijännitteen suuruuteen. Tämän lisäksi suotimia käytettäessä mahdollistetaan pidemmät kaapelivedot taajuusmuuttajalta sähkömoottorille.

### 3.5.1 du/dt-suodin

du/dt-suotimen tarkoituksena on hidastaa edellisessä kohdassa käsiteltyä jännitepulssin nousunopeutta. Tämän suotimen ollessa käytössä, taajuusmuuttajalta lähtevä negatiivinen pulssi ehtii pienentämään moottorin jännitettä ja näin vältetään jyrkästi nouseva jännite moottorissa. Tämän lisäksi du/dt-suotimilla pystytään vähentämään EMC-häiriöitä ja laakerivirtoja. Tämä suodin on yleensä lisävaruste, jonka lisääminen moottoriin kasvattaa luonnollisesti kustannuksia. /4, 10, 18/



### 3.5.2 Sinisuodin

Sinisuotimilla pystytään suojaamaan moottorin eristystä. Sinisuotimen tarkoitus on muokata jännitettä muistuttamaan enemmän sinimuotoista jaksoa. Kun käytössä on sinisuodin, moottorissa ilmenevät häviöt vähenevät ja mahdollistetaan todella pitkät kaapelivedot. Taajuusmuuttajavalmistajat kertovat, että varsinkin yli 150m kaapelivedoilla olisi suotavaa käyttää sinisuodinta. /4, 10/

## 4 TAAJUUSMUUTTAJIEN TEKNISET TIEDOT

Suurin osan taajuusmuuttajalähdöistä toteutetaan Umicore Finland Oy:llä tällä hetkellä, joko ABB:n valmistamalla ACS880-sarjalla tai Danfossin Vacon 100-sarjalla. Tämän kohdan tarkoituksena on tutustua molempien taajuusmuuttajavalmistajien laitteiden ominaisuuksiin sekä teknisiin tietoihin.

### 4.1 ABB ACS880

ABB:n valmistama ACS880-taajuusmuuttaja kuuluu pienjännitetaajuusmuuttajien sarjaan, joka on tarkoitettu varsinkin teollisuudessa käytettäväksi. Taajuusmuuttajia on saatavilla seinä- ja kaappiasennettuina. Taajuusmuuttajaan on sisäänrakennettu turvatoimintoja, jotka luokittelevat taajuusmuuttajan SIL3-turvallisuusluokkaan. Kyseinen malli sisältää ainoastaan ABB:llä käytössä olevan DTC-säädön, jolla moottoria pyöritetään momentinsäätötekniikan avulla. Tätä säätöä käydään läpi luvussa 4.1.2.

ACS880-sarjaan on saatavilla paljon erilaisia lisävarusteita. Näitä lisävarusteita ovat muun muassa erilaiset lähtö- ja tulosuotimet, kuten jo edellä mainitut du/dt-, sini- ja RFI/EMC-suotimet. Suuremman tehon taajuusmuuttajissa kyseisiä suotimia käytetään oletusarvoisesti, mutta pienemmän tehon omaaviin taajuusmuuttajiin voidaan valita suotimia, jos nähdään näille tarvetta.

Taajuusmuuttajat sisältävät erilaisia turvallisuustoimintoja. ACS880-sarjassa on vakiona muun muassa STO-turvallisuustoiminto, jolla pystytään ehkäisemään tahattomat käynnistykset. Muita turvallisuustoimintoja saadaan käyttöön ACS880-taajuusmuuttajassa esimerkiksi FSO-12-turvamoduulilla, joka on nähtävissä kuvassa 17. Tämän moduulin avulla saadaan lisättyä kokonaisuuteen muun muassa turvallinen maksiminopeus-, turvallinen pysäytys-, turvallinen hätäpysäytys-, turvallinen jarrusäätö-, nopeuden turvarajoitus sekä vahinkokäynnistykseen esto. Näitä hyödyntämällä saavutetaan SIL 3-luokitus.

### Supported safety functions

This manual provides instructions for creating the following safety functions (according to EN/IEC 61800-5-2) for the ACS880 drives:

- Safe torque off (STO) – standard feature in the ACS880 drives, see page 53
- Safe brake control (SBC), see page 40
- Safe stop 1 (SS1), see page 59
- Safely-limited speed (SLS), see page 91
- Variable Safely-limited speed (SLS), with PROFIsafe only, see page 114.

Additional safety functions (not specified in EN/IEC 61800-5-2):

- Safe stop emergency (SSE), see page 73
- Safe maximum speed (SMS), see page 119
- Prevention of unexpected start-up (POUS), see page 122.

**Note:** The FSO-12 module does not support an encoder in safety applications.



### Kuva 17. FSO-12-turvatoimintomoduuli. /21/

ABB ilmoittaa taajuusmuuttajillensa suositellut moottorikaapeleiden enimmäispituudet, joilla saadaan varmennettua EMC-vaatimusten täyttyminen. ACS880-sarjassa suositellaan moottorikaapeleiden enimmäispituuden olevan alle 150 m, jotta saadaan EMC-direktiivin suojaukset varmasti täyttymään. Mahdollisuus on käyttää jopa 300 m pitkiä moottorikaapeleita, mutta tällöin kaikki EMC-vaatimukset eivät mahdollisesti täyty.

Taulukossa 4 selviää minkä kokoiset ja tyyppiset sulakkeet, johdonsuojakatkaisijat tai kompaktikatkaisija ovat suositeltavia asennettavaksi kullekin taajuusmuuttajatyypille. Taulukosta nähdään, että gG-kahvasulakkeilla on jopa 100kA katkaisukyky, kun puolestaan johdonsuojakatkaisijoilla samainen katkaisukyky on ainoastaan 5 – 10kA. Pienen katkaisukyvyn takia johdonsuojakatkaisijat eivät useinkaan sovellu käytettäväksi teollisuudessa ison jakelumuuntajan syöttämässä keskukassa. Jos taajuusmuuttajaa suojaamaan asennetaan suurempi suojalaite kuin on kerrottu, takuu luonnollisesti raukeaa ja laitteen käytössä voi esiintyä ongelmia. /4, 19, 20, 21/

Taulukko 4. ACS880-01-taajuusmuuttajan suositellut sulakekoot. /4/

Taajuusmuuttajan tyyppi ACS880-01...	gG-sulakkeet (yksi sulake vaihetta kohden)								Taajuusmuuttajan tyyppi ACS880-01-	Runko-koko	ABB:n johdonsuojakatkaisija		ABB:n Kompaktikatkaisija (Tmax)	
	Min. oikosulkuvirta <sup>1)</sup>	Tulovirta	Sulake					IEC-koko			Typpi	kA <sup>1)</sup>	Typpi	kA <sup>1)</sup>
			A	A	A	A <sup>2</sup> s	V							
$U_N = 400\text{ V}$														
02A4-3	17	2,4	4	53	500	ABB	OFAF000H4	000	R1	S 203 M/P-B/C 6	5	-	-	
03A3-3	40	3,3	6	110	500	ABB	OFAF000H6	000	R1	S 203 M/P-B/C 6	5	-	-	
04A0-3	40	4,0	6	110	500	ABB	OFAF000H6	000	R1	S 203 M/P-B/C 10	5	-	-	
05A6-3	80	5,6	10	355	500	ABB	OFAF000H10	000	R1	S 203 M/P-B/C 13	5	-	-	
07A2-3	80	8,0	10	355	500	ABB	OFAF000H10	000	R1	S 203 M/P-B/C 13	5	-	-	
09A4-3	120	10,0	16	700	500	ABB	OFAF000H16	000	R1	S 203 M/P-B/C 20	5	-	-	
12A6-3	120	12,9	16	700	500	ABB	OFAF000H16	000	R2	S 203 M/P-B/C 32	5	-	-	
017A-3	200	17	25	2 500	500	ABB	OFAF000H25	000	R2	S 203 M/P-B/C 32	5	-	-	
025A-3	250	25	32	4 500	500	ABB	OFAF000H32	000	R3	S 203 M/P-B/C 50	5	-	-	
032A-3	350	32	40	7 700	500	ABB	OFAF000H40	000	R3	S 203 M/P-B/C 63	5	-	-	
038A-3	400	38	50	15 400	500	ABB	OFAF000H50	000	R4	S 803 S-B/C 63	10	-	-	
045A-3	500	45	63	21 300	500	ABB	OFAF000H63	000	R4	S 803 S-B/C 75	10	-	-	
061A-3	800	61	80	37 000	500	ABB	OFAF000H80	000	R5	S 803 S-B/C 125	10	1SDA067918R1	65	
072A-3	1 000	72	100	63 600	500	ABB	OFAF000H100	000	R5	S 803 S-B/C 125	10	1SDA067918R1	65	
087A-3	1 000	87	100	63 600	500	ABB	OFAF000H100	000	R6	-	-	1SDA068555R1	65	
105A-3	1 300	105	125	103 000	500	ABB	OFAF000H125	00	R6	-	-	1SDA068555R1	65	
145A-3	1 700	145	160	185 000	500	ABB	OFAF000H160	00	R7	-	-	1SDA068555R1	65	
169A-3	3300	169	250	600000	500	ABB	OFAF000H250	0	R7	-	-	1SDA054141R1	65	
206A-3	5500	206	315	710000	500	ABB	OFAF1H315	1	R8	-	-	1SDA054365R1	65	
246A-3	6400	246	355	920000	500	ABB	OFAF1H355	1	R8	-	-	1SDA054420R1	65	
293A-3	7800	293	425	1300000	500	ABB	OFAF2H425	2	R9	-	-	1SDA054420R1	65	
363A-3	9400	363	500	2000000	500	ABB	OFAF2H500	2	R9	-	-	1SDA054420R1	65	
430A-3	10200	430	630	2800000	500	ABB	OFAF3H630	3	R9	-	-	1SDA054420R1	65	

#### 4.1.1 Seinäasennetut ACS880-taajuusmuuttajat

Kuvassa 18 on nähtävällä ABB:n ACS880-01-taajuusmuuttajien tuoteperhe. Tämän kohdan tarkoitus on tutustua seinäasennettujen taajuusmuuttajien teknisiin tietoihin. Kyseinen ACS880-01-mallisto on seinälle asennettava taajuusmuuttaja, jonka nimellinen tehoalue 400V asennuksissa on 0,55kW – 250kW.



Kuva 18. ACS880-seinälle asennettävien taajuusmuuttajien tuoteperhe. /4/

Nimellisen tehon kasvaessa, taajuusmuuttajan runkokoko kasvaa välillä R1 – R9. Taulukosta 5 nähdään eri tehoisten seinälle asennettavien taajuusmuuttajien runkokoot. Taajuusmuuttajat ovat yleisesti IP-luokituksestaan IP21-suojaluokassa, mutta mahdollisuus on saada taajuusmuuttajat jopa IP55-suojaluokitukseen asti. /4, 19, 20, 21/

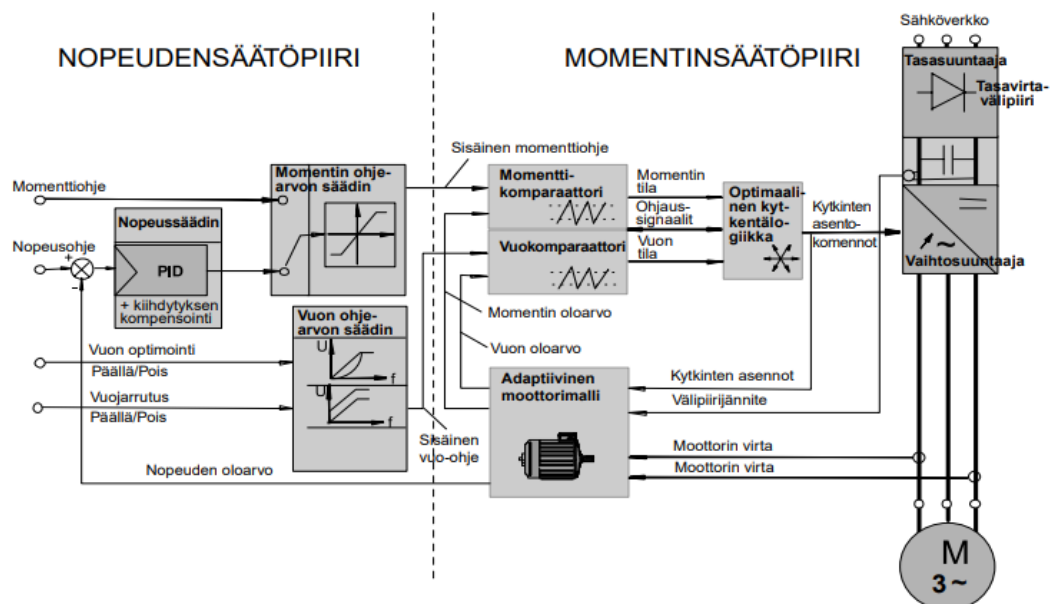
**Taulukko 5.** ABB ACS880 seinäasennettujen taajuusmuuttajien tyyppitiedot. /19/

$U_n = 400 \text{ V}$ (range 380 to 415 V). The power ratings are valid at nominal voltage 400 V (0.55 to 250 kW).												
Drive type	Frame size	Nominal ratings			Light overload use		Heavy-duty use		Noise level (dB(A))	Heat dissipation (W)	Air flow (m <sup>3</sup> /h)	
		$I_n$ (A)	$I_{MAX}$ (A)	$P_n$ (kW)	$I_{Ld}$ (A)	$P_{Ld}$ (kW)	$I_{Hd}$ (A)	$P_{Hd}$ (kW)				
ACS880-01-02A4-3	R1	2.4	3.1	0.75	2.3	0.75	1.8	0.55	46	30	44	
ACS880-01-03A3-3	R1	3.3	4.1	1.1	3.1	1.1	2.4	0.75	46	40	44	
ACS880-01-04A0-3	R1	4.0	5.6	1.5	3.8	1.5	3.3	1.1	46	52	44	
ACS880-01-05A6-3	R1	5.6	6.8	2.2	5.3	2.2	4.0	1.5	46	73	44	
ACS880-01-07A2-3	R1	8.0	9.5	3	7.6	3	5.6	2.2	46	94	44	
ACS880-01-09A4-3	R1	10	12.2	4	9.5	4	8.0	3	46	122	44	
ACS880-01-12A6-3	R1	12.9	16	5.5	12	5.5	10	4	46	172	44	
ACS880-01-017A-3	R2	17	21	7.5	16	7.5	12.6	5.5	51	232	88	
ACS880-01-025A-3	R2	25	29	11	24	11	17	7.5	51	337	88	
ACS880-01-032A-3	R3	32	42	15	30	15	25	11	57	457	134	
ACS880-01-038A-3	R3	38	54	18.5	36	18.5	32	15	57	562	134	
ACS880-01-045A-3	R4	45	64	22	43	22	38	18.5	62	667	134	
ACS880-01-061A-3	R4	61	76	30	58	30	45	22	62	907	280	
ACS880-01-072A-3	R5	72	104	37	68	37	61	30	62	1117	280	
ACS880-01-087A-3	R5	87	122	45	83	45	72	37	62	1120	280	
ACS880-01-105A-3	R6	105	148	55	100	55	87	45	67	1295	435	
ACS880-01-145A-3	R6	145	178	75	138	75	105	55	67	1440	435	
ACS880-01-169A-3	R7	169	247	90	161	90	145	75	67	1940	450	
ACS880-01-206A-3	R7	206	287	110	196	110	169	90	67	2310	450	
ACS880-01-246A-3	R8	246	350	132	234	132	206	110	65	3300	550	
ACS880-01-293A-3	R8 <sup>3)</sup>	293	418	160	278	160	246 <sup>1)</sup>	132	65	3900	550	
ACS880-01-363A-3	R9 <sup>6)</sup>	363	498	200	345	200	293	160	68	4800	1150	
ACS880-01-430A-3	R9 <sup>5)</sup>	430	545	250	400	200	363 <sup>2)</sup>	200	68	6000	1150	

#### 4.1.2 Suora momenttisäätö (DTC)

Tällä hetkellä yleisessä käytössä oleva ohjaustapa taajuusmuuttajalla on perinteinen PWM-käyttö, jossa moottorin ohjaamiseen hyödynnetään lähtötaajuutta ja lähtöjännitettä. Vuonna 1985 ABB kehitti suoran momenttisäädön, jossa taajuuden ja jännitteen sijasta säädetään momenttia ja magneettivuota, eli moottorin todellisia säätösuureita. DTC-käytön merkittävin etu on dynaamiset suoritusarvot, jotka voidaan saavuttaa jopa ilman takometriä, modulaattoria tai akselin asentoanturia. Puolestaan näitä käytettäessä suoritusarvot paranevat entisestään.

Kuvassa 19 on suoran momenttisäädön lohkokkaavio, josta käy ilmi, että DTC-säätö koostuu nopeuden ja momentin säätöpiiristä. DTC-säätö perustuu mahdollisimman tarkkaan tietoon pyöritettävästä moottorista. Tätä varten DTC-käytössä tarvitaan moottorin kilpitiedot, joita käytetään lähtötietoina. Näitä käytettäessä suoritetaan taajuusmuuttajalla moottorille ID-ajo, jonka aikana taajuusmuuttaja tutkii moottorin sähköisiä suureita ja niiden avulla tarkennetaan moottorimallia entisestään. Käynnin aikana moottorin tarkka tila, momentti, magneettivuo ja nopeus lasketaan tarkasti. ID-ajon aikana saadaan moottorin tarkat suureet ja näin ollen koko moottorikäytön suorituskyky paranee entisestään. /10, 22/



**Kuva 19.** Suoran momenttisäädön lohkokkaavio. /22/

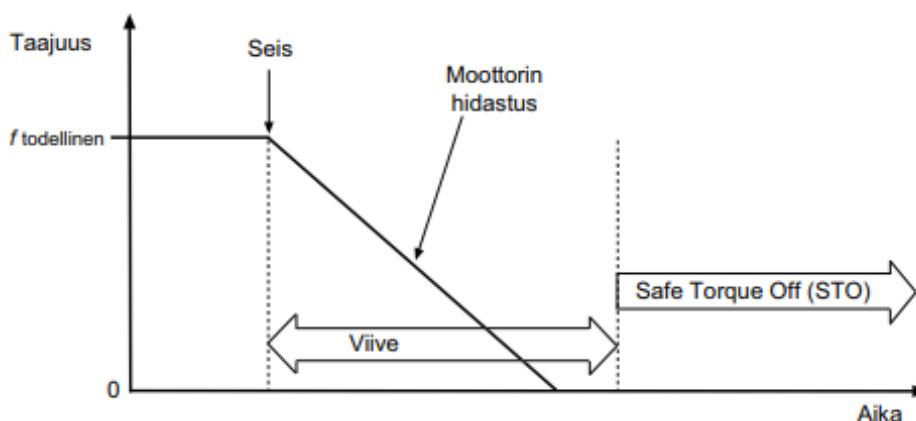
## 4.2 Vacon 100

Danfossin valmistama Vacon 100-taajuusmuuttajasarja on päivitetty versio vanhemmista sarjoista. Vanhempaan Vaconin tuoteperheeseen verrattuna on varsinkin energiatehokkuutta saatu parannettua. Yleisen Vacon 100-sarjan lisäksi on olemassa Vacon 100-FLOW, Vacon 100-HVAC sekä Vacon 100-INDUSTRIAL. /23/

FLOW-sarja on varsinkin pumppu- ja puhallinsovelluksiin tarkoitettu taajuusmuuttaja, jolla saadaan säästettyä energiaa sekä parannettua virtausvalvonnan seuranta.

HVAC-sarja on puolestaan varsinkin rakennusautomaatioalalle tarkoitettu taajuusmuuttaja, jolla saavutetaan tiukimmatkin vaatimukset. INDUSTRIAL-sarja on tarkoitettu etenkin erilaisiin sovelluksiin, joissa ilmenee tehon/momentin muutoksia. /23, 24/

Vacon 100-sarjan taajuusmuuttajiin on saatavilla muun muassa työturvallisuutta parantava OPTBJ-lisäkortti, jolla saadaan STO-toiminto (Safe Torque Off), SS1-toiminto (Safe Stop 1) sekä ATEX-sertifioitu termistoritulo toimimaan. Tämä lisävaruste kannattaa valita varsinkin silloin, kun moottori on asennettuna räjähdysvaaralliseen tilaan. Mikäli taajuusmuuttaja havaitsee moottorin ylikuumenemisen, joka voisi aiheuttaa riskin varsinkin räjähdysvaarallisessa tilassa, katkaisee taajuusmuuttaja virransyöttönsä moottorille välittömästi. Kuvassa 20 on Safe Stop 1 – toiminnan periaate. Kun moottorille annetaan Safe Stop -pysäytyskomento, alkaa moottori hidastamaan pyörimisnopeuttansa. SS1-turvatoiminto käynnistää puolestaan STO-toiminnon itse haluamansa ajan päästä moottorin pysähtymisen jälkeen. /23, 25/



**Kuva 20.** SS1-toiminnan periaatekuva. /25/

Danfoss ilmoittaa taajuusmuuttajillensa moottorikaapeleiden enimmäispituudet, jossa on otettu huomioon valmiiksi RFI/EMC-suotimien lämpeneminen. Samalla näitä ohjeita noudattamalla saadaan varmistettua EMC-vaatimusten täyttyminen. Suojattujen moottorikaapeleiden enimmäispituudet kerrotaan rungon koon mukaan. Pienimmässä runkokoossa MR4 moottorikaapelin enimmäispituus saisi olla korkeintaan 100 m, MR5 ja MR6-kokoluokissa 150 m ja MR7 – MR12 kokoluokassa enimmäispituus saisi olla korkeintaan 200 m. Moottorikaapeleiden enimmäispituudet runkokoissa MR4 – MR9 on nähtävissä taulukosta 6. /23, 26, 27/

**Taulukko 6.** Vacon 100-taajuusmuuttajan enimmäiskaapelipituudet.

Frame size	$f_{sw, nom}$	Without $f_{sw}$ limitations	Limited $f_{sw}$	
	Total motor cable length	Total motor cable length	$f_{sw}$	Total motor cable length
MR4	≤ 100 m	≤ 100 m	≤ 3 kHz	≤ 300 m
MR5	≤ 150 m	≤ 100 m	≤ 3 kHz	≤ 300 m
MR6	≤ 150 m	≤ 150 m	≤ 3 kHz	≤ 300 m
MR7	≤ 200 m	≤ 150 m	≤ 3 kHz	≤ 300 m
MR8	≤ 200 m	≤ 150 m	≤ 3 kHz	≤ 300 m
MR9	≤ 200 m	≤ 150 m	≤ 3 kHz	≤ 300 m

Luvussa 3.2.1 tarkasteltiin EMC:n johtuvia häiriöitä, joissa ilmeni kytkentätaajuuden rajoittamisen mahdollisuus suotimilla. Taulukosta 6 voidaan nähdä, että rajoittamalla kytkentätaajuus pienemmäksi kuin 3 kHz, sallitaan Vacon 100-taajuusmuuttajilla pidemmät kaapelivedot, jotka voivat olla parhaimmillaan 300 metriä.

Danfoss ilmoittaa sulakkeiden, katkaisijoiden ja johdonsuojakatkaisijoidenkoot, joita on asennuksissa noudatettava. Danfoss ilmoittaa myös yleisimmät kaapelikoot moottoriasennuksiin, mutta näitä ei voida suoraan käyttää, vaan kaapelit valitaan olosuhteiden mukaan. Taulukosta 7 ja 8 nähdään Danfossin ilmoittamat sulakkeiden, katkaisijoiden ja johdonsuojakatkaisijoiden koot, joita tulisi noudattaa. /23, 27/

**Taulukko 7.** Sulakkeettomat suojaukset Vacon 100-taajuusmuuttajaan. /27/

Frame	Voltage (V)	Current [A]	MCB catalogue number	Order Code	EAN	EAN
MR4	380-500	3	S203M-C10	2CDS273001R0104	55043 7	4016779550437
MR4	380-500	4	S203M-C10	2CDS273001R0104	55043 7	4016779550437
MR4	380-500	6	S203M-C10	2CDS273001R0104	55043 7	4016779550437
MR4	380-500	8	S203M-C16	2CDS273001R0164	55045 1	4016779550451
MR4	380-500	11	S203M-C16	2CDS273001R0164	55045 1	4016779550451
MR4	380-500	13	S203M-C16	2CDS273001R0164	55045 1	4016779550451
MR5	380-500	16	S203M-C25	2CDS273001R0254	55047 5	4016779550475
MR5	380-500	23	S203M-C32	2CDS273001R0324	55048 2	4016779550482
MR5	380-500	31	S203M-C40	2CDS273001R0404	55049 9	4016779550499
MR6	380-500	38	S803C-C50	2CCS883001R0504	213268	
MR6	380-500	46	S803C-C63	2CCS883001R0634	213428	
MR6	380-500	65	S803C-C100	2CCS883001R0824	213749	
MR7	380-500	72	S803C-C100	2CCS883001R0824	213749	
MR7	380-500	87	S803C-C125	2CCS883001R0844	213909	
MR7	380-500	105	S803C-C125	2CCS883001R0844	213909	
MR8	380-500	140	T3N250FF3TMD200	1SDA051246R1	8015644516666	
MR8	380-500	170	T3N250FF3TMD200	1SDA051246R1	8015644516666	
MR8	380-500	205	T3N250FF3TMD250	1SDA051247R1	8015644516673	
MR9	380-500	261	T4N320FF3LS	1SDA054117R1	8015644552169	
MR9	380-500	310	T5N400FF3LS	1SDA054317R1	8015644552626	



Taulukko 8. Vacon 100-taajuusmuuttajan sulakekoot runkokoon mukaan. /18, 26/

Kokoluokka	Tyyppi	IL [A]	Sulake [gG/gL] [A]	Verkko, moottori ja jarruvastuskaapelit* Cu [mm <sup>2</sup> ]	Liitäntäkaapelikoko	
					Verkkokaapelin liitin [mm <sup>2</sup> ]	Maadoitusliitin [mm <sup>2</sup> ]
MR4	0003 2—0004 2 0003 5—0004 5	3.7—4.8 3.4—4.8	6	3x1.5+1.5	1-6 kiinteä 1-4 säikeellinen	1-6
	0006 2—0008 2 0005 5—0008 5	6.6—8.0 5.6—8.0	10	3x1.5+1.5	1-6 kiinteä 1-4 säikeellinen	1-6
	0011 2—0012 2 0009 5—0012 5	11.0—12.5 9.6—12.0	16	3x2.5+2.5	1-6 kiinteä 1-4 säikeellinen	1-6
MR5	0018 2 0016 5	18.0 16.0	20	3x6+6	1-10 Cu	1-10
	0024 2 0023 5	24.0 23.0	25	3x6+6	1-10 Cu	1-10
	0031 2 0031 5	31.0 31.0	32	3x10+10	1-10 Cu	1-10
MR6	0038 5	38.0	40	3x10+10	2,5-50 Cu/Al	2.5-35
	0048 2 0046 5	48.0 46.0	50	3x16+16 [Cu] 3x25+16 [Al]	2,5-50 Cu/Al	2.5-35
	0062 2 0061 5	62.0 61.0	63	3x25+16 [Cu] 3x35+10 [Al]	2,5-50 Cu/Al	2.5-35
MR7	0075 2 0072 5	75.0 72.0	80	3x35+16 [Cu] 3x50+16 [Al]	6-70 mm <sup>2</sup> Cu/Al	6-70 mm <sup>2</sup>
	0088 2 0087 5	88.0 87.0	100	3x35+16 [Cu] 3x70+21 [Al]	6-70 mm <sup>2</sup> Cu/Al	6-70 mm <sup>2</sup>
	0105 2 0105 5	105.0	125	3x50+25 [Cu] 3x70+21 [Al]	6-70 mm <sup>2</sup> Cu/Al	6-70 mm <sup>2</sup>
MR8	0140 2 0140 5	140.0	160	3x70+35 [Cu] 3x95+29 [Al]	Pultin koko M8	Pultin koko M8
	0170 2 0170 5	170.0	200	3x95+50 [Cu] 3x150+41 [Al]	Pultin koko M8	Pultin koko M8
	0205 2 0205 5	205.0	250	3x120+70 [Cu] 3x185+57 [Al]	Pultin koko M8	Pultin koko M8

Enclosure size	Type	IL [A]	Mains fuses per phase [gG/gL] [A]	Mains and motor cable [Cu/Al] [mm <sup>2</sup> ]	Mains cable terminal, bolt size [mm <sup>2</sup> ]	Grounding terminal, bolt size [mm <sup>2</sup> ]
MR9	0261 2 0261 5	261	315	3x(185+95) [Cu] 2x(3x120+41) [Al]	M10	M8
	0310 2 0310 5	310	350	2x(3x95+50) [Cu] 2x(3x120+41) [Al]	M10	M8
MR10	0385 5	385	400	2x(3x120+70) [Cu] 2x(3x185+57) [Al]	M12	M8
	0460 5	460	500	2x(3x185+95) [Cu] 2x(3x240+72) [Al]	M12	M8
	0520 5	520	630	2x(3x185+95) [Cu] 3x(3x150+41) [Al]	M12	M8
	0590 5	590	630	2x(3x240+120) [Cu] 3x(3x185+57) [Al]	M12	M8
MR12	0650 5	650	2 x 355	4x(3x95+50) 4x(3x120+41)	M12	M8
	0730 5	730	2 x 400	4x(3x95+50) 4x(3x150+41)	M12	M8
	0820 5	820	2 x 500	4x(3x120+70) 4x(3x185+57)	M12	M8
	0920 5	920	2 x 500	4x(3x150+70) 4x(3x240+72)	M12	M8
	1040 5	1040	2 x 630	4x(3x185+95) 6x(3x150+41)	M12	M8
	1180 5	1180	2 x 630	4x(3x240+120) 6x(3x185+57)	M12	M8

#### 4.2.1 Seinäasennetut Vacon 100-taajuusmuuttajat

Yleisimmässä käytössä oleva seinäasennettava Vacon 100-taajuusmuuttaja on näkyvillä kuvassa 21. Kyseisen mallin tehoalue 400V jännitteellä on 1,1kW – 160kW. Kokoluokissa MR4 – MR6 Vacon 100-taajuusmuuttajat sisältävät vakiona integroidun jarrukatkojan.



**Kuva 21.** Seinäasennettavat Vacon 100-taajuusmuuttajat. /23/

Seinäasennettuja Vacon 100-taajuusmuuttajia on saatavilla runkokokoissa MR4 – MR9. Nimellisen tehon kasvaessa, taajuusmuuttajan runkokoko kasvaa edellä mainittujen runkokokojen välillä. Taulukosta 9 nähdään seinälle asennettavien taajuusmuuttajien tehoalueet. Taajuusmuuttajat ovat yleisesti IP-luokituksestaan IP21-suoja-luokassa, mutta on mahdollista saada taajuusmuuttajat jopa IP54-suoja-luokitukseen asti. /23/

**Taulukko 9.** Seinäasennettujen Vacon 100-taajuusmuuttajien tyyppitiedot. /23/

Verkköjännite 380-500 V, 50-60 Hz	Moduulitaajuusmuuttaja	Kaapitettu taajuusmuuttaja	Pieni ylikuormitus -INDUSTRIAL, -FLOW			Suuri ylikuormitus -INDUSTRIAL			Maksimivirta I <sub>s</sub> (2s) [A]	Kokoluokka
			Kuormitetavuus	Moottorin akseliteho		Kuormitetavuus	Moottorin akseliteho			
				40 °C jatkuva virta I <sub>rated</sub> [A]	400 V syöttöteho 40 °C LO [kW]		480 V NEMA / NEC teho 40 °C LO [HP]	50 °C jatkuva virta I <sub>rated</sub> [A]		
VACON 0100-3L-0003-5-xxxx			3,4	1,1	1,5	2,6	0,75	1	5,2	MR4
VACON 0100-3L-0004-5-xxxx			4,8	1,5	2	3,4	1,1	1,5	6,8	
VACON 0100-3L-0005-5-xxxx			5,6	2,2	3	4,3	1,5	2	8,6	
VACON 0100-3L-0008-5-xxxx			8	3	4	5,6	2,2	3	11,2	
VACON 0100-3L-0009-5-xxxx			9,6	4	5	8	3	4	16	
VACON 0100-3L-0012-5-xxxx			12	5,5	7,5	9,6	4	5	19,2	
VACON 0100-3L-0016-5-xxxx			16	7,5	10	12	5,5	7,5	24	
VACON 0100-3L-0023-5-xxxx			23	11	15	16	7,5	10	32	MR5
VACON 0100-3L-0031-5-xxxx			31	15	20	23	11	15	46	
VACON 0100-3L-0038-5-xxxx			38	18,5	25	31	15	20	62	MR6
VACON 0100-3L-0046-5-xxxx			46	22	30	38	18,5	25	76	
VACON 0100-3L-0061-5-xxxx			61	30	40	46	22	30	92	MR7
VACON 0100-3L-0072-5-xxxx			72	37	50	61	30	40	122	
VACON 0100-3L-0087-5-xxxx			87	45	60	72	37	50	144	
VACON 0100-3L-0105-5-xxxx			105	55	75	87	45	60	174	
VACON 0100-3L-0140-5-xxxx	*	-ED	140	75	100	105	55	75	210	MR8
VACON 0100-3L-0170-5-xxxx	*	-ED	170	90	125	140	75	100	280	
VACON 0100-3L-0205-5-xxxx	*	-ED	205	110	150	170	90	125	340	
VACON 0100-3L-0261-5-xxxx	*	-ED	261	132	200	205	110	150	410	
VACON 0100-3L-0310-5-xxxx	*	-ED	310	160	250	251	132	200	502	MR9

\* IP00, IP21 ja IP54

\*\* IP00

#### 4.2.2 Kaappiasennetut Vacon 100-INDUSTRIAL taajuusmuuttajat

Vacon 100-taajuusmuuttajaa on saatavilla myös kaappiasennettuna versiona, mutta Umicore Finland Oy:n tuotannossa käytössä on kaappiasennettuina ratkaisuihin INDUSTRIAL-sarja. INDUSTRIAL-sarjan taajuusmuuttajia on saatavilla 400V jännitteellä tehoalueella 1,1kW – 630kW. Kyseistä taajuusmuuttajaa on saatavilla seinä- ja kaappiasennettuina ratkaisuihin. Kuvassa 22 on nähtävissä kaappiasennettu taajuusmuuttaja, jota käytetään, kun tehoalueet alkavat menemään suuremmaksi.



**Kuva 22.** Kaappiasennettu Vacon 100-INDUSTRIAL taajuusmuuttaja. /23/

Kokoluokasta MR8 eteenpäin on Vacon 100-INDUSTRIAL taajuusmuuttajaa saatavilla kaappiasennettuna. Taulukosta 10 nähdään kaappiasennettujen taajuusmuuttajien tehoalueet. Kokoluokassa MR10 ja MR12 taajuusmuuttajat ovat saatavilla IP-luokituksena IP00. /23/

**Taulukko 10.** Kaappiasennettujen Vacon 100-INDUSTRIAL tyyppitiedot. /23/

Verkkojännite 380-500 V, 50-60 Hz	Moduulitaajuusmuuttaja	Kaapitettu taajuusmuuttaja	Pieni ylikuormitus -INDUSTRIAL, -FLOW			Suuri ylikuormitus -INDUSTRIAL			Maksimivirta I <sub>s</sub> (2s) [A]	Kokoluokka
			Kuormitettavuus	Moottorin akseliteho		Kuormitettavuus	Moottorin akseliteho			
				40 °C jatkuva virta I <sub>out</sub> [A]	400 V syöttöteho 40 °C LO [kW]		480 V NEMA / NEC teho 40 °C LO [HP]	50 °C jatkuva virta I <sub>out</sub> [A]		
VACON 0100-3L-0140-5-xxxx	* -ED	-ED	140	75	100	105	55	75	210	MR8
VACON 0100-3L-0170-5-xxxx	* -ED	-ED	170	90	125	140	75	100	280	
VACON 0100-3L-0205-5-xxxx	* -ED	-ED	205	110	150	170	90	125	340	
VACON 0100-3L-0261-5-xxxx	* -ED	-ED	261	132	200	205	110	150	410	MR9
VACON 0100-3L-0310-5-xxxx	* -ED	-ED	310	160	250	251	132	200	502	
VACON 0100-3L-0385-5-xxxx	** -ED	-ED	385	200	300	310	160	250	620	MR10
VACON 0100-3L-0460-5-xxxx	** -ED	-ED	460	250	350	385	200	300	770	
VACON 0100-3L-0520-5-xxxx	** -ED	-ED	520	250	450	460	250	350	920	
VACON 0100-3L-0590-5-xxxx	** -ED	-ED	590	315	500	520	250	450	1040	MR12
VACON 0100-3L-0650-5-xxxx	** -ED	-ED	650	355	500	590	315	500	1180	
VACON 0100-3L-0730-5-xxxx	** -ED	-ED	730	400	600	650	355	500	1300	
VACON 0100-3L-0820-5-xxxx	** -ED	-ED	820	450	700	730	400	600	1460	
VACON 0100-3L-0920-5-xxxx	** -ED	-ED	920	500	800	820	450	700	1640	
VACON 0100-3L-1040-5-xxxx	** -ED	-ED	1040	560	900	920	500	800	1840	
VACON 0100-3L-1180-5-xxxx	** -ED	-ED	1180	630	1000	920	500	800	1840	

\* IP00, IP21 ja IP54  
\*\* IP00

## **5 TAAJUUSMUUTTAJAKÄYTÖN KOMPONENTTIEN VALINTA JA MITOITUS**

Aloitettaessa mitoittamaan komponentteja ja kaapeleita taajuusmuuttajalta moottorille, on otettava huomioon monia asioita. Mitoituksen lisäksi kaapelin suojaus on tärkeä. Tässä kohdassa käydään läpi asioita, jotka liittyvät myöhemmin tässä työssä tehtävään esimerkkilaskuun, jonka pohjalta moottorikaapelointitaulukko on luotu. Moottorikaapelointitaulukko sisältää taajuusmuuttajan valinnan lisäksi kaapeleiden, oikosulku- ja ylikuormitussuojan, turvakytkimen ja moottorin valinnat.

### **5.1 Kaapelin valitseminen**

Taajuusmuuttajan ja moottorin välisessä kaapeloinnissa on ensimmäisenä valittava käytettävän kaapeli. Kaapelivedon voi toteuttaa esimerkiksi normaalilla PVC-eristeisellä MCMK tai AMCMK-kaapeloinnilla, mutta näillä kaapeleilla ei pystytä hyödyntämään EMC-suojausta.

Kun halutaan toteuttaa asennukset EMC-suojausten vaatimien ohjeiden mukaan, on käytettävä suojattua kaapelia, kuten MCCMK tai AXCCMK-kaapelia. Näiden kaapeleiden heikkona kohtana voidaan pitää tällä hetkellä kaapeleiden saatavuutta. Varsinkin suojattua alumiinikaapelia on enimmäkseen tällä hetkellä saatavilla vain yleisemmistä kokoluokista, jonka takia joudutaan tässä työssä valitsemaan myös suojaamattomia alumiinikaapeleita joihinkin tilanteisiin.

#### **5.1.1 Yleistä asennuksista**

Kaapelin valitsemisen lisäksi on huomioitava taajuusmuuttajan ja moottorin sijainnit. Tämän työn tarkoituksena on luoda moottorikaapelointitaulukko, josta voidaan valita moottorikaapeli ilman lisäselvityksiä kullekin moottoriteholle.

Tämän takia on otettava huomioon moottorikeskus – taajuusmuuttaja sekä taajuusmuuttaja – moottori väliset etäisyydet. Yleisesti moottorikaapelivedot ovat Umicore Finland Oy:n tehtaalla noin 30m – 150m. Tästä syystä työssä laaditaan moottorikaapelointitaulukko 150m moottorikaapelivedoille, jotta tämä on pätevä jokaiseen asennukseen. Puolestaan moottorikeskus – taajuusmuuttaja väliset

kaapelietäisyydet ovat lyhyempiä ja ovat tyypillisesti enintään muutaman kymmenen metrin luokkaa.

Molemmat edellisistä kaapelivedoista toteutetaan yhtä suuren poikkipinta-alan omaavilla kaapeleilla. Luvussa 3 käytiin läpi yliaaltovirtoja, joita esiintyy taajuusmuuttajakäytöissä ja moottorissa. Taajuusmuuttajan syötössä yliaaltovirrat ovat suurempia, minkä lisäksi moottorikaapelissa ilmenee loisvirtaa. Näiden syiden takia virrat eivät ole ennen taajuusmuuttajaa ja taajuusmuuttajan jälkeen saman suuruisia, vaan virroissa esiintyy poikkeamia. Näitä ei oteta kaapelin mitoituksessa huomioon, vaan kaapeloinnit mitoitetaan samalla virralla.

### 5.1.2 Kaapelin kuormitettavuus

Kaapelin kuormitettavuus tarkoittaa suurinta sallittua virtaa, jolla johdinta tai laitteistoa voidaan kuormittaa jatkuvasti siten, että johtimien lämpötilat eivät ylitä sallittuja arvoja. Johtimessa tapahtuu tehohäviöitä virran kulkemisen takia, joka muuttuu lämmöksi ja näin ollen lämmittää myös vieressä olevia kaapeleita. Kun johtimia kuormitetaan jatkuvasti sallittujen arvojen sisällä, pystytään takaamaan kaapelille tyydyttävä käyttöikä olosuhteet huomioon ottaen. Lämpötilan ylitys on myös riski tulipalolle.

Kaapelin kuormitettavuuden määrittämisessä on otettava huomioon johtimen materiaali, kaapelin eristemateriaali, asennustapa, ympäristön lämpötila sekä muiden vieressä olevien kaapeleiden läheisyys. Nämä kaikki vaikuttavat kuormitettavuuteen, sillä näillä määrittyy korjauskertoimet, joita tarvitaan laskentaan. Vuoden 2017 SFS6000-pienjännitestandardissa määritellään kaapelin erilaisille eristeaineille suurimmat sallitut käyttölämpötilat, jotka ovat luettavissa taulukosta 11. /2/

**Taulukko 11.** Kaapeleiden eristeaineiden suurimmat käyttölämpötilat. /2/

Eristetyyppi	Lämpötilan raja-arvo °C
Termoplastinen (Polyvinyylikloridi PVC)	70 johtimessa
Silloitettu polyteeni (PEX) ja eteenipropeenikumi (EPR)	90 johtimessa
Mineraali (PVC:llä päällystetty tai paljas ja kosketeltavissa)	70 vaipassa
Mineraali (paljas, ei kosketeltavissa eikä kosketuksissa palaviin materiaaleihin)	105 vaipassa

Liitteen 2 taulukoissa 19 ja 20 on Prysmian Groupin valmistamien kaapeleiden tekniset tiedot, joista selviää PVC- ja PEX-eristettyjen kupari- ja alumiinikaapeleiden sallitut kuormittavuudet kullakin poikkipinta-alalla. Tässä työssä käytetään valintana aina mahdollisuuksien mukaan PEX-eristeisiä monijohdinkaapeleita, joissa on kolme kuormitettua johdinta. PVC-eristeisiä monijohdinkaapeleita käytetään tässä työssä ainoastaan silloin, kun PEX-eristeistä kaapelia ei ole saatavilla.

Tässä työssä otetaan huomioon asennustapa, jota noudatetaan Umicore Finland Oy:n tuotantotiloissa. Asennustapana on kaksi tikashyllyä päällekkäin, jossa on enintään kuusi kaapelia rinnakkain, jotka voivat koskettaa toisiaan. Tikashyllyt täytetään ainoastaan yhteen kerrokseen, joten kaapeleita ei saa asentaa valmiiksi täytille tikashyllyille. Tuotantotiloissa kulkee valmiiksi tikashyllyjä, joihin on mahdollisesti asennettu jo kaapeleita. Näihin laskelmat eivät ole päteviä, sillä korjauskertoimet voivat tässä tapauksessa vaihdella. Tuotantotilojen lämpötila on oletetusti 40°C. Laskut pätevät ainoastaan silloin, jos tätä asennusohjetta noudatetaan. Taulukossa 12 on korjauskertoimet, joita tässä työssä käytetään, kun mitoitetaan kaapeleita taajuusmuuttajalta moottorille. Kertoimet on otettu vuoden 2017 SFS6000-pienjännitstandardien taulukoista, jotka ovat nähtävillä liitteen 2 taulukoista 17 ja 18.

**Taulukko 12.** Työssä käytettävät korjauskertoimet. /2/

Asennus	Määrä/Lämpötila	SFS6000 (2017)	Korjauskertoin
Vierekkäiset kaapelit + 2 hyllyä päällekkäin	6 kpl	B.52.20	0,73
Ympäristön lämpötila (PEX)	40 °C	B.52.14	0,91
Ympäristön lämpötila (PVC)	40 °C	B.52.14	0,87

Aloittaessa laskemaan kaapelin kuormitettavuutta, tarvitaan ensimmäiseksi moottorin nimellisvirta. Nimellisvirralla tarkoitetaan suurinta jatkuvaa virtaa, jonka moottori kestää lämpenemättä yli sallitun lämpenemän ympäristöön nähden (yleensä 80°C). Tämä saadaan laskettua yhtälöllä 3. Tällä yhtälöllä saadaan lähes sama tulos kuin moottorivalmistajat ilmoittavat moottoriluetteloissaan. Jos käytävissä on moottorin tarkat kilpitiedot, on näitä suositeltava käytettäväksi.

$$I_{moottori} = \frac{\left(\frac{P_n}{\eta}\right)}{(\sqrt{3} * U * \cos\varphi)}, \text{ jossa} \quad (3)$$

$I_{moottori}$  = moottorin nimellisvirta (A)

$P_n$  = moottorin nimellisteho (W)

$\eta$  = moottorin nimellishyötysuhde (100%)

U = Pääjännite (V)

$\cos\varphi$  = moottorin nimellistehokerroin.

Kun tiedetään moottorin nimellisvirta, voidaan tämän avulla laskea moottorikaapelin vaadittava kuormitettavuus, jonka moottorikaapelin on vähintään täytettävä. Tämän laskemiseen tarvitaan kuormitettavuuteen vaikuttavia korjauskertoimia, jotka ovat luettavissa taulukosta 10. Yhtälöllä 4 saadaan laskettua kaapelilta vaadittava vähimmäiskuormitettavuus.

$$I_{kaapeli} = \frac{I_{moottori}}{C1 * C2}, \text{ jossa} \quad (4)$$

$I_{kaapeli}$  = kaapelin min. kuormitettavuus

$I_{moottori}$  = moottorin nimellisvirta (A)

C1 = korjauskerroin, jossa kuusi kaapelia rinnan ja kaksi hyllyä päällekkäin

C2 = PEX-eristeinen kaapeli 40°C ympäristön lämpötilassa.

Kun tiedetään moottorikaapelin vaadittava vähimmäiskuormitettavuus, voidaan tämän jälkeen valita moottorikaapeli. Kaapelivalmistajat kertovat kunkin kaapelinsa suurimman sallitun kuormitettavuuden arvon taulukossaan, jonka on oltava suurempi kuin moottorin nimellisvirrasta laskettu vähimmäiskuormitettavuus.

Moottorikaapelia valittaessa kannattaa miettiä myös tulevaisuuden muutoksia. Tämän takia on suositeltavaa yleensä valita yhtä kokoluokkaa suurempi poikkipinta-alainen kaapeli, jos moottorikaapelin kuormitettavuus olisi juuri sallittujen rajojen sisällä. Näin saadaan myös mahdollisuus suurentaa moottorin kokoluokkaa, ilman uuden moottorikaapelin vetämistä.

### 5.1.3 Kaapelin enimmäispituus jännitteenaleneman kannalta

Jännitteenalenema tarkoittaa liittymispisteen ja minkä tahansa kuormituspisteen välillä esiintyvää jännitepudotusta voltteina, kun sitä verrataan asennuksen nimellisiin jännitteeseen. Taulukossa 13 on nähtävillä vuoden 2017 SFS6000-pienjänniteasennuksissa kerrotut jännitealenemaprocentit (taulukko G52.1). Kyseisessä taulukossa suositellaan, että jännitealenema olisi pienjänniteasennuksissa, jotka ovat syötettyinä jakeluverkosta korkeintaan 5% nimellisiin jännitteestä. Jännitealenemaa voidaan hyväksyä hetkellisesti, jos se esiintyy moottorin käynnistyksen aikana. Tällöin arvo pitää pysyä kuitenkin laitteiden vaatimien arvojen sisällä. Nämä arvot liittyvät kuitenkin julkiseen sähköjakeluun. /2/

**Taulukko 13.** Jännitealeneman hyväksytyt rajat julkisessa sähköjakelussa. /2/

Asennuksen tyyppi	Valaistuskäyttö %	Muu käyttö %
A – Pienjänniteasennus, joka on syötetty suoraan yleisestä jakeluverkosta	3	5
B – Pienjänniteasennus, joka on syötetty yksityisestä teholähteestä <sup>a</sup>	6	8
<sup>a</sup> Suositellaan, että niin pitkälle kuin mahdollista ryhmäjohtojen jännitteenalenema ei ylitä asennustyyppille A annettuja arvoja. Kun asennuksen pääjohdot ovat pitempiä kuin 100 m, näitä jännitteenalenemia voidaan kasvattaa 0,005 % johdon 100 m ylittävän pituuden metriä kohti. Ilman tätä lisäystä se ei saa olla suurempi kuin 0,5 %. Jännitteenalenema määritellään sähkölaitteen tehontarpeen mukaan käyttäen soveltuvin osin tasoituskertoimia, tai käyttäen piirien suunniteltuja virtoja.		

Teollisuusverkossa puolestaan moottorikeskuksessa sekä moottoria syöttävässä kaapelissa sopivana jännitteenalenemarajana pidetään jatkuvassa käytössä yleensä +-3% luokkaa. Mikäli teollisuudessa jännitteenalenema olisi suurempi, tarkoittaisi tämä virran suurenemista moottoreilla niiden käydessä nimelliskuormalla. Tällöin virta-arvo saattaa olla suurempi kuin moottorin kilpiarvoissa mainittu nimellisvirta. Myös moottorin vääntömomentti on verrannollinen jännitteeseen ( $U^2$ ), jolloin momentti jää nimellisarvoja pienemmäksi.

Käynnistyksen yhteydessä moottorissa esiintyy korkeampi jännitteenalenema kuin jatkuvassa käytössä. Suuren moottorin käynnistyksen aikana syntyvä hetkellinen jännitteenalenema ei saisi olla korkeampi kuin 10%. Tätä suuremmat hetkelliset jännitteenalenemat voivat aiheuttaa keskuksissa sijaitsevien kontaktorien päästämisestä, liian pienen kelajännitteen vuoksi. Merkittävä alenema syntyy keskuksien lisäksi myös kunkin moottorin omassa syöttökaapelissa, jossa sallitaan samainen 10% jännitteenalenema. Tähän jännitealenema prosenttiin on joissakin tilanteissa



vaikea päästä, jonka takia saatetaan sallia käynnistyksen yhteydessä esiintyvä jännitteenalenema olevan 5% - 15%. /8/

Jännitteenalenemista esiintyy yleisesti pitkissä kaapelivedoissa, jonka takia pitkissä kaapelivedoissa joudutaan joissakin tapauksissa turvautumaan yleensä suuremman poikkipinta-alan omaavaan kaapeliin. Likimääräinen jännitteenalenema jatkuvassa käytössä voidaan laskea voltteina yhtälöllä 5.

$$\Delta U = I * l * \sqrt{3} * (r * \cos\varphi + x * \sin\varphi), \text{ jossa} \quad (5)$$

$I$  = moottorin nimellisvirta (A)

$l$  = kaapelin pituus (km)

$r$  = kaapelin ominaisresistanssi ( $\Omega/\text{km}$ )

$x$  = kaapelin ominaisreaktanssi (mH/km)

$\cos\varphi$  = moottorin nimellistehokerroin

$\sin\varphi$  = moottorin nimellisloistehokerroin.

Yhtälöstä 5 saatu tulos voidaan muuttaa prosenteiksi käyttämällä yhtälöä 6.

$$\Delta u[\%] = \frac{\Delta U}{U_N} * 100\%, \text{ jossa} \quad (6)$$

$\Delta u$  = muutos prosenteina (%)

$\Delta U$  = jännitealenema voltteina (V)

$U_N$  = nimellisjännite (V).

Jännitealeneman laskemiseen tarvitaan myös käytössä olevan kaapelin resistanssi- ja reaktanssi arvot. Kaapelivalmistajat ilmoittavat resistanssi- ja reaktanssi arvot manuaaleissaan, joten kyseiset arvot poikkeavat jonkin verran toisistaan. Tarkimman mahdollisen jännitteenaleneman saa laskettua, kun käytetään asennetun kaapelin teknisiä arvoja, jotka ovat saatavilla kaapelivalmistajalta. Jos halutaan laskea satunnaisia arvoja, voidaan käyttää hyödyksi taulukkoa, jossa on likimääräisesti kerrottuna jännitealeneman laskemiseen tarvittavat arvot. Taulukossa 14 on kerrottu ominaisresistanssit ja -reaktanssit johtimen lämpötilan ollessa 80°C. Näitä voidaan käyttää, jos kaapelin johtimien tarkempia arvoja ei ole saatavilla. /2, 3/

Likimääräinen käynnistyksessä ilmenevä jännitteenalenema voidaan laskea puolestaan yhtälöllä 7. Tähän tarvitaan moottorivalmistajan manuaaleista kunkin moottorin käynnistysvirta. Myös moottorin käynnistyksen aikana ilmenevä tehokerroin olisi tiedettävä, mutta jos tätä ei ole saatavilla voidaan myös käyttää kontaktorikoestusten mukaisia arvoja, jotka ovat 0,35 yli 100A virroilla ja 0,45 alle 100A virroilla.

$$\Delta U_{start} = I * I_s * l * \sqrt{3} * (r * \cos\varphi_{start} + x * \sin\varphi_{start}), \text{ jossa} \quad (7)$$

$I$  = moottorin nimellisvirta (A)

$I_s$  = moottorin käynnistysvirta

$l$  = kaapelin pituus (km)

$r$  = kaapelin ominaisresistanssi ( $\Omega/\text{km}$ )

$x$  = kaapelin ominaisreaktanssi (mH/km)

$\cos\varphi$  = tehokerroin  $\rightarrow 0,45/0,35$

$\sin\varphi$  = tehokerroin  $\rightarrow 0,893029/0,93675$ .

**Taulukko 14.** Likimääräiset kaapelin resistanssi- ja reaktanssiarvot. /11/

Johtimien poikkipinta A/mm <sup>2</sup>	Kupari			Alumiini		
	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z
4 × 1,5	14,620	0,115	14,620			
4 × 2,5	8,770	0,110	8,770			
4 × 4	5,480	0,107	5,480			
4 × 6	3,660	0,100	3,660			
4 × 10	2,244	0,094	2,246			
4 × 16	1,415	0,090	1,418	2,324	0,090	2,326
4 × 25	0,898	0,086	0,902	1,489	0,086	1,492
4 × 35	0,652	0,083	0,657	1,086	0,083	1,089
4 × 50	0,482	0,083	0,489	0,796	0,083	0,800
4 × 70	0,336	0,082	0,346	0,551	0,082	0,557
4 × 95	0,244	0,082	0,257	0,398	0,082	0,406
4 × 120	0,195	0,080	0,211	0,316	0,080	0,326
4 × 150	0,155	0,080	0,174	0,258	0,080	0,270
4 × 185	0,125	0,080	0,148	0,207	0,080	0,222
4 × 240	0,095	0,079	0,124	0,162	0,079	0,180
4 × 300	0,078	0,079	0,111	0,133	0,079	0,155

## 5.2 Taajuusmuuttajan ja moottorin mitoitus kuormitettavuuden ja hetkellisen momenttitarpeen mukaan

Tässä kohdassa tutkitaan taajuusmuuttajakäytön jatkuvaa kuormitettavuutta, joka on otettava huomioon moottoria ja taajuusmuuttajaa valittaessa. Taajuusmuuttaja-valmistajat ilmoittavat manuaaleissaan normaalin ja raskaan käytön suurimmat

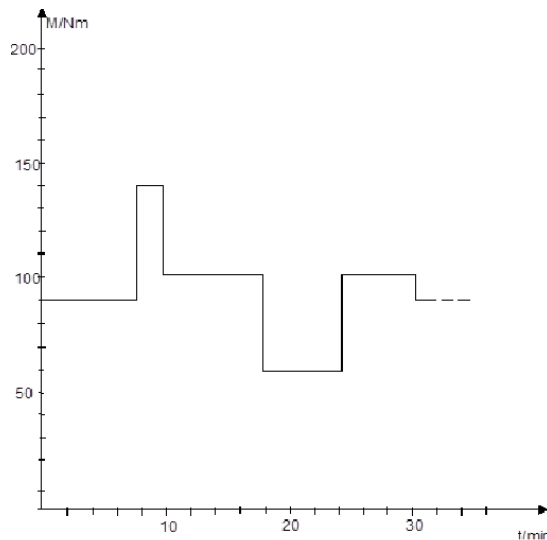
sallitut kuormitettavuudet kullekin taajuusmuuttajatyypillensä. Moottoriluette-loissa olevat moottorit ovat yleensä jatkuvan käytön moottoreita.

### **5.2.1 Jatkuva S1-käyttö**

Tässä esimerkissä tarkastellaan suoraan verkkoon kytketyn moottorin jatkuvaa kuormitettavuutta. Jatkuvalla käytöllä tarkoitetaan moottoria, joka pyörittää kuormaa koko ajan tasaisella kuormituksella. Jatkuvan käytön konetta voidaan kuormittaa koko ajan moottorin nimellisteholla sekä moottorin käynnistyksiä esiintyy vähäisesti. Harvoin on tilanteita, että moottoria pyöritetään tasaisella kuormalla koko ajan, mutta näissä tapauksissa moottori valitaan jatkuvan käytön mukaan. /13, 31/

Valittaessa moottoria jatkuvan kuorman pyörittämiseen on tarkistettava kaksi asiaa. Ensimmäisenä on valittava moottori, jonka moottoritehon on oltava vähintään yhtä suuri kuin kuorman vaatima teho. Toisena asiana tulee tarkastaa käytettävän moottorin käynnistysmomentti, käynnistysaika ja huippumomentti. /13/

Mitoittaessa moottoria S1-käytölle on tiedettävä kuorman ottama momentti tietyllä aikavälillä. Käytetään kuvan 23 kaltaista esimerkkitehtävää, jossa on laskettava tarvittava moottori kyseiselle kuormalle. Kuorma ottaa 30 minuutin sisällä momenttia välillä 60 – 140 Nm. Valitaan laskujen perusteella moottoriluettelosta vastamomenttiin mitoitettu napapariluvun 2 omaava 1500 rpm moottori.



**Kuva 23.** Kuorman ottama momentti S1-käytössä.

Ensimmäisenä on laskettava kuorman ekvivalenttimomentti, joka saadaan laskettua yhtälöllä 8. Ekvivalenttimomentin avulla voidaan valita moottoriluettelosta moottori, jonka nimellinen momentti on oltava vähintään yhtä suuri tai suurempi kuin ekvivalenttimomentti  $\rightarrow M_N \geq M_e$ .

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t M_L^2 dt}, \text{ jossa} \quad (8)$$

$M_e$  = ekvivalenttimomentti

$t$  = jakson pituus

$M_L$  = kuorman ottama momentti.

Lasketaan kuvan 23 ekvivalenttimomentti käyttämällä yhtälöä 8.

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{30} * [90^2 * 8 + 140^2 * 2 + 100^2 * 8 + 60^2 * 6 + 100^2 * 6]} = 94,1 Nm$$

Laskusta saadaan selville, että vaadittava moottorin nimellinen momentti on oltava tässä tapauksessa vähintään 94,1 Nm. Taulukossa 15 on 1500 rpm kierroksisten oikosulkumoottoreiden tekniset tiedot, josta voidaan nähdä, että 15 kW moottori on kyseiseen käyttöön sopiva. Tämän moottorin nimellinen momentti on 96,99 Nm, joka on suurempi kuin laskettu ekvivalenttimomentti.

Edellinen laskenta perustuu siihen, että verrataan muuttuvan kuorman virtalämpöhäviöitä (verrannollinen  $I^2$ ) tasaiseen ekvivalenttikuormaan. Tämän lisäksi on oletettu, että vääntömomentin ja tehon virta ovat verrannollisia. Tämän takia lyhytaikainen kuormituspiikki ei vaikuta kovin paljoa laskettuun ekvivalenttimomenttiin tai tehoon. /10/

Tämän lisäksi on tarkistettava valitun moottorin suurin sallittu momentti. Tämän on ylitettävä kuorman ottama suurin hetkellinen momentti (140 Nm). Yhtälöllä 9 saadaan tarkastettua moottorin suurin  $M_{max}$ . Tähän tarvitaan valitun moottorin  $T_b$  arvoa, joka saadaan samaisesta moottoritaulukosta. Tämän avulla voidaan todeta, että moottori on sopiva kyseiseen käyttötarkoitukseen.

$$M_{max} = T_b * M_N, \text{ jossa} \quad (9)$$

$M_{max}$  = moottorin suurin sallittu momentti

$T_b$  = momentin kerroin moottoritaulukosta

$M_N$  = moottorin nimellinen momentti.

$$M_{max} = T_b * M_N \rightarrow M_{max} = 3,7 * 96,99Nm = 358,86Nm \geq 140Nm \rightarrow OK.$$

Moottorin valintaan lyhyet hetkelliset ylikuormat eivät vaikuta, koska moottori ei juurikaan ehdi lämmetä näiden aikana. Yhtälöstä 9 saadusta tuloksestakin huomataan, että moottori sallii hetkellisiä ylikuormitustilanteita aina huippumomenttiin saakka, joka on yleensä noin kolme kertaa nimellismomentti. Taajuusmuuttajan valintaan hetkelliset kuormitustilanteet vaikuttavat ja nämä on otettava huomioon. /10/

### 5.3 Taajuusmuuttajan normaali ja raskas käyttö

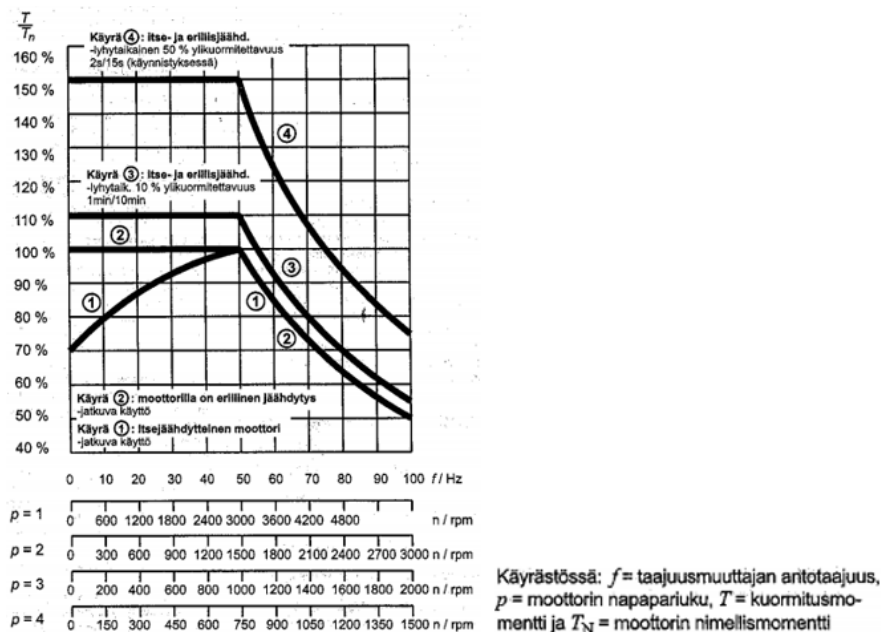
Moottorin jatkuvaa kuormitettavuutta taajuusmuuttajakäytössä vähentää pienillä syöttötaajuuksilla ja nopeuksilla moottorin huonompi tuuletus. Jos moottorin jäähdytys on toteutettu akselille suoraan asennettuna jäähdytystuulettimella, on tämän pyörimisnopeus suoraan yhteydessä moottorin pyörimisnopeuteen. Moottorin pyöriessä hitaammin kuin nimellisnopeus, moottori lämpenee enemmän jäähdytyksen ollessa tällöin heikompi. Mikäli moottoria kuormitetaan jatkuvasti yli

nimellistaajuudella ja nopeudella, moottorin momenttia rajoittaa puolestaan kentänheikkensalueen suurempi virta, josta seuraa moottorin suurempi häviöteho. /13/

Moottorin sallima jatkuva vääntömomenti eri syöttötaajuuksilla ja nopeuksilla on esitettyä kuvissa 24 ja 25 (käyrä 1). Taajuusmuuttajakäytössä pitää tällöin siis tarkistaa, että vääntömomenti riittää kaikilla pyörimisnopeuksilla. Tämä voi johtaa moottorikoon kasvattamiseen. Kuvissa nähtävät rajoituskäyrät on suuntaa antavia. Mikäli halutaan saada tarkemmat rajoituskäyrät, ovat nämä saatavilla taajuusmuuttajavalmistajalta tuotekohtaisesti.

### 5.3.1 Taajuusmuuttajan normaali käyttö

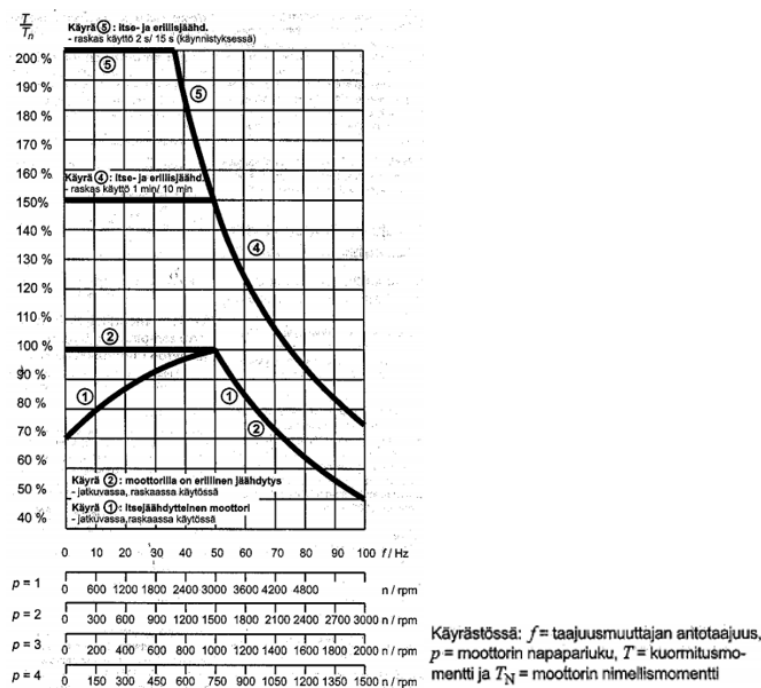
Kuvassa 24 on esitetty normaali käyttötavan taajuusmuuttajan kuormituskäyrä. Taajuusmuuttaja, joka valitaan normaalikuormitettavuuden mukaan, voidaan nimellistaajuudella kuormittaa jatkuvasti nimellismomentilla ja -teholla. Prosessissa ei saa esiintyä tämän normaalikuorman lisäksi paljoa ylikuormaa, sillä normaali käyttötavan mukaan valittu taajuusmuuttaja sallii ainoastaan 10% ylikuorman. Tätä ylikuormaa saa kestää ainoastaan yhden minuutin verran, jonka jälkeen seuraava ylikuorma sallitaan vasta kymmenen minuutin kuluttua. Käynnistyksen sekä käytön yhteydessä voi esiintyä ylikuormaa, jossa sallitaan 50% lyhytaikainen ylikuormitettavuus, joka saa kestää 2 sekunnin ajan vähintään 15 sekunnin välein.



**Kuva 24.** Taajuusmuuttajan normaali käyttötavan kuormitus- ja rajoituskäyrä. /13/

### 5.3.2 Taajuusmuuttajan raskas käyttötapa

Kuvassa 25 on esitetty raskaan käyttötavan taajuusmuuttajan kuormituskäyrä. Taajuusmuuttaja, joka valitaan raskaan käytön mukaan, voidaan nimellistaajuudella kuormittaa jatkuvasti nimellismomentilla ja -teholla. Raskaan käytön eroavaisuus normaali käyttöön ilmenee ylikuormitettavuuden kohdalla. Valittaessa raskaan käytön mukaan taajuusmuuttaja, voi prosessissa esiintyä 50% ylikuormitusta yhden minuutin ajan vähintään 10 minuutin välein. Käynnistyksen sekä käytön yhteydessä voi esiintyä ylikuormaa, jossa sallitaan 100% lyhytaikainen ylikuormitettavuus. Tätä saa kestää 2 sekunnin ajan vähintään 15 sekunnin välein. Jos kuormassa esiin-  
tyy ylikuormaa, on suotavaa valita taajuusmuuttaja raskaan käytön mukaan.



**Kuva 25.** Taajuusmuuttajan raskaan käyttötavan kuormitus- ja rajoituskäyrä. /13/

### 5.4 Moottorikeskuksen kalustus

Tässä kohdassa käydään läpi moottorikeskuksen komponentteja sekä moottorilähdön suojaus- ja suojauslaitteita, joita on käytössä Umicore Finland Oy:n tiloissa. Käytössä voi olla sulakkeilla toteutettu moottorilähtö tai vaihtoehtoisesti sulakkeeton, joka tarkoittaa moottorilähdön toteuttamista johdonsuojakatkaisijoilla, katkaisijoilla tai moottorin-suojakytkimellä.

### 5.4.1 Ylikuormitussuojaus

Virtapiirissä voi esiintyä ylivirtaa muulloinkin kuin pelkästään vikatilanteessa. Tätä ylivirtaa, joka ilmenee virtapiirissä ilman vikaa, voidaan kutsua ylikuormitusvirraksi /3/. Ylikuormitussuojauksen tarkoituksena on tässä työssä suojata moottori-kaapeleita. Huomiota on kiinnitettävä tässä työssä myös siihen, että taajuusmuuttajavalmistajat kertovat omat sulakesuosituksensa, joita tulee noudattaa. Tätä neuvoa noudattamalla taataan myös taajuusmuuttajan suojaaminen. Jos ylivirtasuojaus jätettäisiin toteuttamatta, kaapeli voi pahimmassa tapauksessa muuttua käyttökelvottomaksi. Ylikuormitussuojauksen pitää katkaista ylikuormitusvirta ennen kuin kaapeleiden lämpötila, eristys, jatkokset, liitokset tai itse johdin vioittuu /3/.

Ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa muun muassa gG-sulakkeilla, mutta tässä työssä gG-sulakkeilla toteutetaan ainoastaan oikosulkusuojaus niiden korkean katkaisukyvyyn takia. Ylikuormitussuojaus toteutetaan puolestaan taajuusmuuttajan omalla ylikuormitussuojausfunktiolla tai vaihtoehtoisesti erillisellä lämpöreleellä.

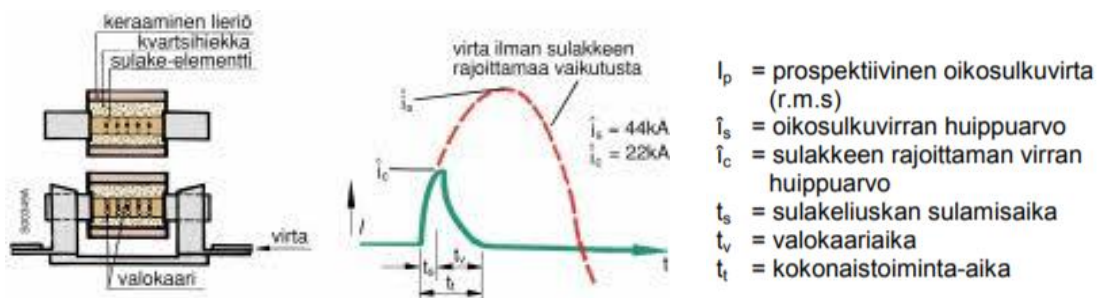
### 5.4.2 Oikosulkusuojaus

Oikosulkusuojauksella on kaksi keskeistä vaatimusta, jotka tämän on täytettävä. Ensimmäinen vaatimus on, että oikosulkusuojaus on tehtävä riittävän nopeasti poiskytkentä, jotta laitteet eivät vioittuisi oikosulun aikana. Toisena vaatimuksena on kyky katkaista piirissä tapahtuva suurin oikosulkuvirta. Oikosulkusuojausta valittaessa tämän nimellinen virta voi olla suurempi kuin johdon kuormitettavuus. Tämän lisäksi oikosulkusuojaus tulee sijoittaa aina syöttävän kaapelin alkupäähän. /5, 11/

Tarkastellaan hieman oikosulkuvirran rajoittamista gG-sulakkeilla. Taajuusmuuttajavalmistajat voivat ilmoittaa gG-sulaketaulukoissaan  $I^2s$  arvon, joka tarkoittaa sulakkeen suurinta sallittua arvoa läpi pääsevästä energiasta.

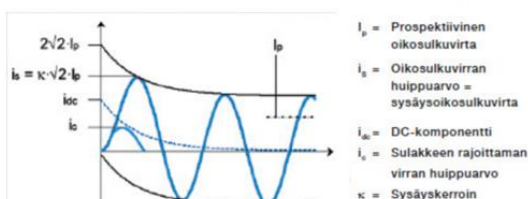
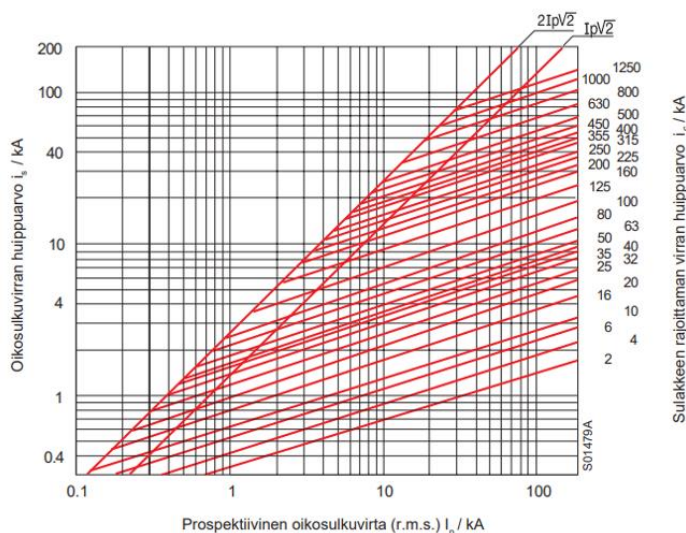


Kuvasta 26 nähdään kahvasulakkeen rakenne sekä tämän toimiminen oikosulussa suurella oikosulkuvirralla. Oikosulku kasvaisi ilman sulaketta oikosulkuvirran huippuarvoon, joka voi olla moninkertainen siihen nähden, että oikosulkuvirta katkaistaisiin gG-kahvasulakkeella.



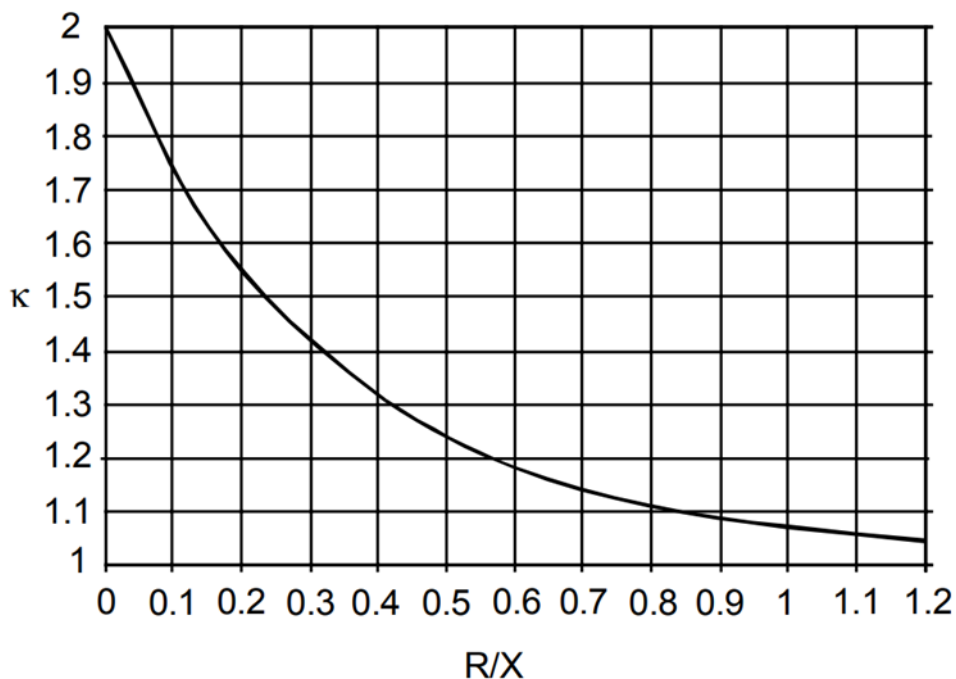
**Kuva 26.** Kahvasulakkeen toiminta oikosulun tapahtuessa. /33/

Tehdään esimerkki, jossa oletetaan prospektiivisen oikosulkuvirran  $I_p$  arvon olevan 20kA ja valitaan suojaamaan gG-sulake, joka on kooltaan 250A. Kuvassa 27 on gG-sulakkeiden virranrajoitus, josta nähdään 250A sulakkeen läpimenevä suurin virtahuipunarvon olevan noin 19kA, prospektiivisen oikosulkuvirran ollessa 20kA. Teoreettisesti ilman sulaketta oikosulkuvirta voisi nousta paljon korkeammalle. Teoreettinen maksimi oikosulkuvirta tässä tapauksessa olisi parhaimmillaan  $2 * 20kA * \sqrt{2} = 56,57kA$ .



**Kuva 27.** gG-kahvasulakkeiden virranrajoituskäyrä. /29/

Teoreettisesti maksimi oikosulkuvirta esiintyy, mikäli transientti ei ehdi vaimentua ja oikosulku sattuu virran luonnollisella nollakohdalla. Tämä tarkoittaa sitä, että oikosulkuvirta esiintyisi puhtaasti reaktiivisessa verkossa. Todellinen oikosulkuvirta on jotakin tältä väliltä. Tämä voidaan arvioida kuvan 28 mukaisella kertoimella, joka riippuu oikosulkupiirin R/X suhteesta. Ison jakelumuuntajan perässä tämä arvo voi olla esimerkiksi 0,1, jolloin kerroin tulisi olemaan noin 1,7.

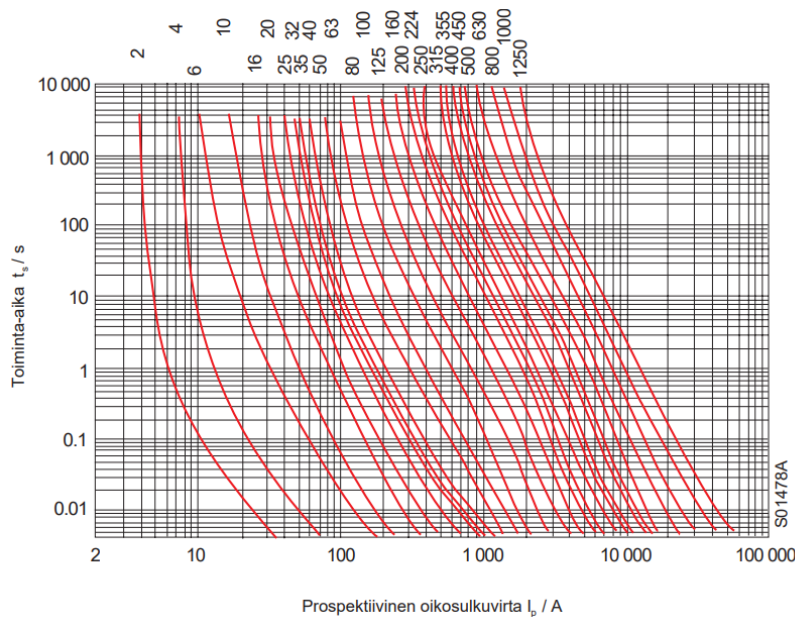


**Kuva 28.** Sysäskertoimen määrittäminen oikosulkuvirtapiirin R/X suhteesta. /33/

Todellinen suurin oikosulkuvirta olisi siis parhaimmillaan  $1,7 * 20\text{kA} * \sqrt{2} = 48\text{kA}$ . Voidaan siis todeta, että sulaketta käyttäessä oikosulkuvoimat jäävät paljon pienemmäksi kuin ilman sulaketta. /33/

### 5.4.3 Sulakkeilla toteutettu moottorilähtö

Kahvasulakkeiden oikosulkuvirran katkaisukyky on yleensä 100kA asti, kun taas puolestaan johdonsuojakatkaisijoilla katkaisukyky on yleisesti noin 5 - 10kA luokkaa /5, 8/. Kuten aiemmassa vaiheessa jo on kerrottu, tässä työssä käsitellään ainoastaan gG-kahvasulakkeita. Kahvasulakkeita on olemassa aina 2A - 1250A asti, joiden IEC-kokoluokka (000 – 4a) määräytyy virran suuruudesta. Mikäli oikosulkuvirta on niin pieni, ettei se riitä virran katkaisemiseen ennen huippuarvoa, rajoittaa gG-sulake kuitenkin oikosulkuvirran kestoa oheisen kuvan 29 mukaisesti /29/



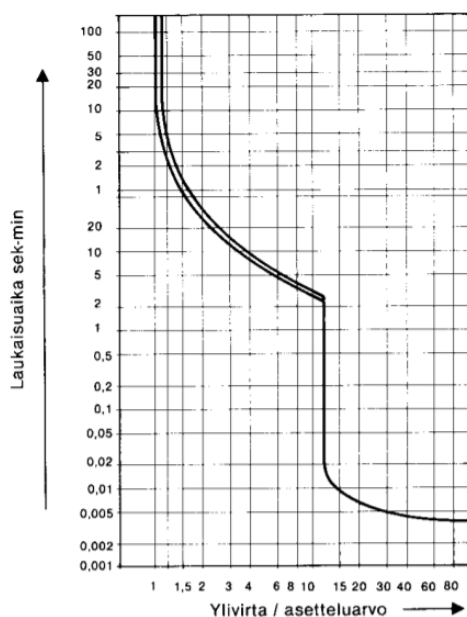
**Kuva 29.** gG-sulakkeiden toiminta-ajat. /29/

#### 5.4.4 Sulakkeeton moottorilähtö

Taajuusmuuttajalähdön voi toteuttaa myös sulakkeettomasti, mikä tarkoittaa suo-  
jauksen toteuttamista johdonsuojakatkaisijalla, moottorisuojakytkimellä tai katkai-  
sijalla. Taulukoista 2 ja 5 selviää ABB:n ja Danfossin ilmoittamat johdonsuojakat-  
kaisijat ja katkaisijat, joita voidaan käyttää taajuusmuuttajan suojaamiseen.

Taajuusmuuttajavalmistajat kertovat manuaaleissaan komponentit, joilla voidaan  
taata suojausten toimivan. Näin ollen esimerkiksi moottorisuojakytkimillä toteutet-  
tuihin ratkaisuihin eivät taajuusmuuttajavalmistajat ota kantaa, vaan näiden käyttö  
on omalla vastuulla. Aiemmassa vaiheessa on jo todettu johdonsuojakatkaisijoiden  
katkaisukyvyyn olevan heikko, jonka takia johdonsuojakatkaisijat eivät sovellu kun-  
nolla teollisuusympäristöön /13/. Tästä syystä joissakin tilanteissa kytkinvarokkeen  
tilalle asennetaan moottorisuojakytkin, vaikka taajuusmuuttajavalmistajat eivät tätä  
suosittele.

Moottorisuojakytkimen vahvuuksia ovat suuri oikosulkuvirtakatkaisukyky sekä kompakti koko. Moottorisuojakytkin pystyy katkaisemaan jopa 100kA virran, nimellisjännitteen ollessa 400V /13/. Moottorisuojakytkintä voidaan käyttää moottoreille, joiden nimellisvirta on korkeintaan 32 A. Mahdollisuus on siis käyttää moottorisuojakytkintä 15 kW moottoreihin asti, jonka jälkeen virtarajat tulevat vastaan. Tätä suuremmat moottorilähdöt on toteutettu yleensä kytkinvarokkeilla. Kuvassa 30 on esitettyä moottorisuojakytkimen virta/aikaominaiskäyrä.



**Kuva 30.** Moottorisuojakytkimen virta-/aikaominaiskäyrä. /13/

## 6 TAULUKOIDEN LAADINTA

Tämän luvun tarkoitus on laskuesimerkin avulla selvittää kuinka moottorikaapeli- taulukko luotu. Tarvittavat komponentit taajuusmuuttajalähtöön, kuten kontaktori, moottorisuojakytkin, kytkinvaroke sekä turvakytkin ovat valittuna luvussa 6.2.

### 6.1 Esimerkki moottorikaapeloinnin laskemisesta

Tässä kohdassa tehdään laskuesimerkki, miten työssä on valittu taajuusmuuttaja, moottorikaapeli sekä moottori 15 kW moottorilähtöön. Samaa menetelmää käyttämällä on laskettu muutkin moottorin teholuokat.

Työn moottoreiksi on valittuna ABB:n valmistamia oikosulkumoottoreita, jotka ovat energiatehokkuusluokaltaan IE3-luokassa. Kyseisiä oikosulkumoottoreita on saatavilla 1000 rpm, 1500 rpm ja 3000 rpm nopeuksilla. Puolestaan 750 rpm moottorit on otettu energiatehokkuusluokan IE2-luokasta. Yleisimmässä käytössä ovat 1000 ja 1500 rpm moottorit, joten laskuesimerkki ja valinnat on tehty tässä esimerkissä 1500 rpm moottorin teknisistä arvoista. Puolestaan varsinaisessa valintataulukossa on laskut suoritettu 1000 rpm moottorin virran, tehokertoimen ja hyötysuhteenarvoilla.

Käytössä on myös muiden valmistajien moottoreita, jolloin eroja voi ilmentyä, mutta keskimääräiset arvot ovat soveltuvia tähän käyttötarkoitukseen. Tässä esimerkissä kuitenkin käytetään tarkkoja ABB:n moottoriluettelossa olevia hyötysuhde- ja tehokerroinarvoja.

Kun tiedetään oikosulkumoottorin teho, voidaan valita taajuusmuuttaja moottorin ottaman tehon ja virran mukaan. Tässä esimerkissä käytetyn 1500 kierroksen ja 15 kW moottorin nimellinen virta on 28,5 A, joka selviää taulukosta 15. Samasta taulukosta voidaan myös lukea moottorin hyötysuhde nimellispyörimisnopeudella, käynnistysvirta sekä teholliskerroin.

## Taulukko 15. 1500 rpm oikosulkumoottoreiden tekniset tiedot. /28/

IP 55 - IC 411 - Insulation class F, temperature rise class B  
IE3 efficiency class according to IEC 60034-30-1; 2014

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency IEC 60034-30-1; 2014			Power factor Cosφ	Current		Torque			Moment of inertia J = 1/4 GD <sup>2</sup> kgm <sup>2</sup>	Weight kg	Sound pressure Level L <sub>pa</sub> dB
				Full load 100%	3/4 load 75%	1/2 load 50%		I <sub>n</sub> A	I <sub>l</sub> /I <sub>n</sub>	T <sub>n</sub> Nm	T <sub>l</sub> /T <sub>n</sub>	T <sub>l</sub> /T <sub>n</sub>			
1500 r/min = 4 poles															
400 V 50 Hz															
CENELEC-design															
0.25	M3BP 71MD 4	3GBP072340-...L	1416	73,5	75,1	73,8	0,8	0,6	4,8	1,68	2	2,6	0,0009	11	45
0.37	M3BP 71MLE 4	3GBP072450-...L	1432	77,3	77,4	74,5	0,76	0,9	5,8	2,46	2,7	3,3	0,00122	15	45
0.55	M3BP 80MLC 4	3GBP082430-...L	1444	80,8	81,6	80,1	0,8	1,2	6,7	4	3	3,5	0,0028	20	45
0.75	M3BP 80MLE 4	3GBP082450-...L	1424	82,5	83,2	81,8	0,76	1,74	6,1	5	2,5	3,4	0,0016	22	50
1.1	M3BP 90LA 4	3GBP092510-...L	1437	84,1	83,7	81,2	0,78	2,46	8	7,32	3,3	3,8	0,007	28	50
1.5	M3BP 90LB 4	3GBP092520-...L	1445	85,3	85	82,7	0,75	3,34	7,6	9,95	3,4	4,1	0,007	32	50
2.2	M3BP 100LA 4	3GBP102510-...L	1455	86,7	86,6	84,6	0,8	4,6	7,9	14,4	3,2	4	0,011	38	54
3	M3BP 100MLB 4	3GBP102420-...L	1445	87,7	88,2	87,6	0,83	5,9	7,7	19,8	2,8	3,5	0,014	42	63
4	M3BP 112ME 4	3GBP112350-...L	1451	88,6	89,4	89	0,77	8,6	7,6	26,3	3,1	4,1	0,018	52	64
5.5	M3BP 132SMB 4	3GBP132220-...L	1460	89,6	90,1	89,6	0,82	11	6,6	35,9	2,2	3,3	0,031	68	66
7.5	M3BP 132SME 4	3GBP132250-...L	1462	90,4	91	90,3	0,79	15,6	6,7	48,9	2,5	3,4	0,037	78	63
11	M3BP 160MLA 4	3GBP162410-...L	1477	91,4	91,8	91,1	0,82	21,1	7,6	71,27	2,6	3,3	0,11	160	61
15	M3BP 160MLB 4	3GBP162420-...L	1477	92,1	92,4	91,6	0,82	28,5	8,2	96,99	3	3,7	0,135	179	61
18.5	M3BP 180MLA 4	3GBP182410-...L	1481	92,6	93,2	92,9	0,83	34,9	7,2	119,3	2,8	3	0,219	215	60
22	M3BP 180MLB 4	3GBP182420-...L	1481	93	93,5	93,3	0,82	41,4	8,3	142	3	3,2	0,243	229	60
30	M3BP 200MLA 4	3GBP202410-...L	1483	93,6	93,9	93,4	0,84	54,8	7,5	193,2	2,7	3,2	0,385	292	63
37	M3BP 225SMA 4	3GBP222210-...L	1482	93,9	94,1	93,8	0,83	68,9	7,2	238,6	3,1	3,1	0,427	322	67
45	M3BP 225SMB 4	3GBP222220-...L	1482	94,2	94,4	94	0,84	82,3	8	290	3,2	3,5	0,525	357	66
55	M3BP 250SMA 4	3GBP252210-...L	1482	94,6	94,7	94	0,84	100	7,1	354,2	2,9	3,4	0,694	406	68
75	M3BP 280SMB 4	3GBP282220-...L	1485	95	95,2	94,8	0,86	133	6,4	483	2,3	2,8	1,38	645	75
90	M3BP 280SMC 4	3GBP282230-...L	1485	95,2	95,5	95,2	0,86	158	7,1	578	2,5	2,9	1,73	700	75
110	M3BP 315SMB 4	3GBP312220-...L	1489	95,4	95,5	95	0,84	198	7	705	2,1	3	2,43	930	71
132	M3BP 315SMC 4	3GBP312230-...L	1488	95,6	95,9	95,5	0,86	231	6,7	847	2,2	2,9	2,9	1000	71
160	M3BP 315SMD 4	3GBP312240-...L	1488	95,8	96	95,8	0,85	282	6,9	1026	2,2	3	3,2	1065	71
200	M3BP 315MLB 4	3GBP312420-...L	1487	96	96,4	96,4	0,86	351	6,8	1284	2,4	3	3,9	1220	74
250	M3BP 355SMA 4	3GBP352210-...L	1491	96	96	95,6	0,86	435	6,4	1601	2,1	2,9	5,9	1610	78
315	M3BP 355SMB 4	3GBP352220-...L	1491	96	96,1	95,7	0,85	550	7,3	2018	2,4	3,3	6,9	1780	78
355	M3BP 355SMC 4	3GBP352230-...L	1490	96	96,2	95,8	0,86	616	6,3	2273	2,3	2,8	7,2	1820	78

Valittaessa taajuusmuuttajaa moottorille, on suotavaa valita yhtä kokoluokkaa isompi taajuusmuuttaja. Tällä voidaan varmistaa, että moottorin tilalle voidaan vaihtaa yhtä kokoluokkaa isompi moottori, jolloin taajuusmuuttajaa, eikä moottorikaapelia jouduta vaihtamaan. Moottorikaapelin kuormitettavuus sekä jännitteena- lenema on kuitenkin tarkastettava, mikäli moottori vaihdettaisiin. Tässä työssä on valittuna taajuusmuuttajat raskaan käytön mukaan. Näin ollen normaalissa käytössä, jossa kuorma ei vaihtelee paljoa, voidaan ilman ongelmia asentaa tilalle yhtä kokoa suurempi oikosulkumoottori.

ABB:n 15 kW moottorin ohjaukseen voidaan siis valita, joko ABB:n ACS880-038A-3 (32 A raskas käyttö) taajuusmuuttaja tai vaihtoehtoisesti Danfossin Vacon 0100-3L-0038-5-xxxx (31 A raskas käyttö) taajuusmuuttaja. Nämä tekniset tiedot ovat nähtävillä taulukoissa 5 ja 9.

Kun taajuusmuuttaja ja oikosulkumoottori on valittu, voidaan alkaa mitoittamaan tarvittavaa moottorikaapelia. Moottorikaapelin mitoittamista varten tarvitaan kaapelivalmistajalta suurimmat sallitut kuormitettavuudet. Nämä kuormitettavuudet ovat nähtävissä liitteen 2 taulukoissa 19 ja 20.

Esimerkkiä käyttäen 15 kW ja 28,5 A virran omaavalle moottorille on valittava moottorikaapeli, jonka kuormitettavuus jatkuvassa käytössä on suurempi kuin moottorin ottama virta. Tähän on vielä otettava huomioon asennustavasta tulevat korjauskertoimet sekä kaapelin eristeestä johtuva kerroin.

Taajuusmuuttajavalmistaja määrittelee suurimman sallitun käytettävän sulakkeen, jota tulisi noudattaa. Valituilla taajuusmuuttajilla on erikokoiset sulakevaatimukset. ABB:n taajuusmuuttajalla 50A gG-sulakkeet ja Vacon 100-taajuusmuuttajalla puolestaan 40A gG-sulakkeet.

Moottorikaapelin vaadittava vähimmäiskuormitettavuus lasketaan käytettävän moottorin nimellisvirrasta, johon otetaan huomioon korjauskertoimet. Korjauskertoimet, joita tässä työssä käytetään, on luettavissa taulukosta 12. Yhtälöllä 4 pystytään laskemaan kuormitettavuus, jonka moottorikaapelin on vähintään täytettävä.

$$I_{kaapeli} = \frac{I_{moottori}}{C1 * C2} \rightarrow I_{kaapeli} = \frac{28,5A}{0,73 * 0,91} = 42,9A$$

Valittaessa kaapelia on tämän kuormitettavuus oltava siis vähintään n. 43 A. Liitteen 2 taulukoissa 19 ja 20 on PEX-eristeisten kupari- ja alumiinikaapeleiden suurimmat sallitut kuormitettavuudet. Kaapelivalmistajan taulukoista nähdään, että käyttöön sopisi kuormitettavuuden perusteella jopa 6mm<sup>2</sup> kuparikaapeli, jonka sallittu kuormitettavuus on 57 A. Kun kyseessä on pienitehoinen moottori, on järkevintä käyttää kuparikaapelia. Tarkastetaan 6mm<sup>2</sup>, 10mm<sup>2</sup> ja 16mm<sup>2</sup> PEX-eristeisillä MCCMK-kuparikaapeleilla kuormitettavuudet.

$$I_{z6mm\ kupari} = 57A \geq 43A$$

$$I_{z10mm\ kupari} = 77A \geq 43A$$

$$I_{z16mm\ kupari} = 100A \geq 43A$$

Jokainen näistä kolmesta kaapelista sopisi tähän työhön kuormitettavuuden perusteella, sillä ne ylittävät 43 A vähimmäiskuormitettavuusrajan. Huomioon on

otettava kuitenkin mahdollinen moottorin tehon kasvaminen sekä jännitteenalenema. Tästä syystä valitut kaapelit tarkastetaan jännitteenaleneman kannalta. Jännitteenaleneman laskemiseen on käytetty 150 m pituisia kaapelinvetoja, sillä ABB ja Danfoss kertovat manuaaleissaan EMC-suojauksien toimivan varmasti tällä pituudella (pois lukien Vacon 100-MR4 kokoluokka, jossa enimmäispituus 100m). Tuotantotiloissa tapahtuvat kaapelivedot ovat myös enintään 150 m pituisia. Kaapelipituuksien ollessa pidempiä, on syytä laskea silloinen jännitteenalenema. Jännitteenaleneman laskemiseen tarvitaan moottorin nimellinen virta sekä käytettävän kaapelin ominaisresistanssi- ja ominaisreaktanssi arvot. Kaapeleiden arvot ovat luettavissa liitteessä 2 sijaitsevasta kaapelivalmistajan taulukosta 19. Lasketaan kolmella valitulla kaapeleilla niissä esiintyvät jännitteenalenemat voltteina yhtälöllä 5.

$$I_{z6mm\ kupari} \Delta U = I * l * \sqrt{3} * (r * \cos\varphi + x * \sin\varphi) \rightarrow \Delta U = 28,5A * 0,15km * \sqrt{3} * (3,69\Omega * 0,82 + (2 * \pi * 50Hz * 0,30mH * 10^{-3} * 0,572364)) = 22,8V$$

$$I_{z10mm\ kupari} \Delta U = I * l * \sqrt{3} * (r * \cos\varphi + x * \sin\varphi) \rightarrow \Delta U = 28,5A * 0,15km * \sqrt{3} * (2,19\Omega * 0,82 + (2 * \pi * 50Hz * 0,29mH * 10^{-3} * 0,572364)) = 13,68V$$

$$I_{z16mm\ kupari} \Delta U = I * l * \sqrt{3} * (r * \cos\varphi + x * \sin\varphi) \rightarrow \Delta U = 28,5A * 0,15km * \sqrt{3} * (1,38\Omega * 0,82 + (2 * \pi * 50Hz * 0,28mH * 10^{-3} * 0,572364)) = 8,75V$$

Näistä saadut tulokset voidaan muuttaa jännitteenalenemaprocenteiksi käyttämällä yhtälöä 6.

$$I_{z6mm\ kupari} \Delta u[\%] = \frac{\Delta U}{U_N} * 100\% \rightarrow \Delta u[\%] = \frac{22,8V}{400V} * 100\% = 5,7\%$$

$$I_{z10mm\ kupari} \Delta u[\%] = \frac{\Delta U}{U_N} * 100\% \rightarrow \Delta u[\%] = \frac{13,68V}{400V} * 100\% = 3,42\%$$



$$I_{z16mm\text{ kupari}} \Delta u[\%] = \frac{\Delta U}{U_N} * 100\% \rightarrow \Delta u[\%] = \frac{8,75V}{400V} * 100\% = 2,19\%$$

Jännitteenaleneman kannalta moottorikaapelointi voidaan toteuttaa MCCMK 3 x 16/16mm<sup>2</sup> kaapeloinnilla, sillä jännitteenalenema on alle 3%. Jos valittaisiin MCCMK 3 x 6/6mm<sup>2</sup> tai 3 x 10/10mm<sup>2</sup> olisi kaapeloinnin osalta jännitteenalenema ollut suurempi kuin 3%. Lyhyemmissä kaapelivedoissa olisi voitu valita MCCMK 3 x 10/10mm<sup>2</sup> kaapeli (enintään noin 135 m), mutta moottorikaapelointitaulukosta on tarkoitus tehdä yksinkertainen ja jokaiseen tilanteeseen pätevä, joten järkevintä on valita MCCMK 3 x 16/16mm<sup>2</sup> kaapeli.

Tutkitaan vielä vertailun vuoksi suoran käynnistystavan (D.O.L) yhteydessä esiintyvää jännitteenalenemaa. Tähän työhön tämä ei vaikuta suoraan, sillä moottorin käynnistäminen toteutetaan taajuusmuuttajalla, jolloin ei tapahdu äkillistä suoraa käynnistystä. Käynnistys tapahtuu yleensä muutamissa sekunneissa, jolloin virta ei nouse äkillisesti. Moottorikaapeloinnissa on otettu huomioon tämän käynnistystavan mahdollisuus ja se on toteutettu siten, että moottorin käynnistäminen on mahdollista suorittaa ilman taajuusmuuttajaa. Yhtälöllä 7 saadaan laskettua jännitteenalenema käynnistyksen aikana.

$$\Delta U_{start} = I * I_n * l * \sqrt{3} * (r * \cos\varphi_{start} + x * \sin\varphi_{start}) \rightarrow$$

$$\Delta U_{start} = 28,5 * 8,2A * 0,15km * \sqrt{3} * (1,38\Omega * 0,45 + 0,087965H * 0,893029)$$

$$\Delta U_{start} = 42,4749V$$

Tämä tulos saadaan muunnettua vielä prosenteiksi käyttämällä yhtälöä 6.

$$\Delta u[\%] = \frac{\Delta U}{U_N} * 100\% \rightarrow \Delta u[\%] = \frac{42,4749V}{400V} * 100\% = 10,62\%$$

Jännitteenalenema käynnistyksen aikana on hieman suurempi kuin suositeltu 10 %, mutta taajuusmuuttajakäyttöön tällä ei ole merkitystä. Moottorikaapelointien pituus ei ole tietenkään aina 150 m pitkiä, vaan kaapelivedot voivat olla tätäkin pidempiä. Tästä syystä joudutaan myös tapauskohtaisesti tarkastelemaan tilannetta, jos pitkiä vetoja ilmenee. Tehdyistä laskuista voidaan todeta, että MCCMK 3 x 16/16mm<sup>2</sup> soveltuu 15 kW kokoiselle moottorille.

Taajuusmuuttajavalmistajat kertovat manuaaleissaan kuinka suuren poikkipinta-alan omaavan johtimen voi korkeintaan kytkeä taajuusmuuttajan liittimiin. Joissakin tapauksissa on turvauduttava kuparikaapelointiin, sillä alumiinikaapeleita ei saa suoraan kiinnitettyä taajuusmuuttajan liittimiin liian suuren poikkipinta-alan takia. Jos moottori sijaitsee räjähdysvaarallisessa tilassa, on suositeltavaa tehdä moottorikaapelointi kuparikaapelilla. Alumiinikaapelia käytettäessä poikkipinta-ala on suurempi ja näin ollen moottorin kytkentäkopassa olevat liittimet ovat lähempänä toisiaan mikä lisää riskiä kipinöinnille.

## 6.2 Taajuusmuuttajälähdön komponenttien valinta

Kun taajuusmuuttaja, moottori ja moottorikaapeli on saatu valittua, voidaan valita myös tarvittavat komponentit taajuusmuuttajälähtöä varten. Umicore Finland Oy:n tiloissa on käytössä OESA-kytkinvarokelähtö tai vaihtoehtoisesti PKE-moottorisuojakytkinlähtö, vaikka tämä ei ole taajuusmuuttajavalmistajan hyväksymä oikosulkusuoja. Edellisen kohdan laskuesimerkkiä hyödyntäen valitaan 15 kW moottorille komponentit, jotka ovat nähtävissä taulukossa 16.

**Taulukko 16.** Taajuusmuuttajälähdön komponentit 15 kW moottorille.

15 kW taajuusmuuttajälähdön komponentit	
Taajuusmuuttaja	ABB ACS880-038A-3 / Vacon 0100-3L-0038-5-xxxx
Kytkinvaroke/moottorisuojakytkin + laukaisijaosa	OESA125 / PKE-32 + PKE-XTU-32
Kontaktori	ABB AF30/15kW
Moottorikaapeli	MCCMK 3x16/16mm <sup>2</sup>
Turvakytkin	ABB OTE36T3M

Moottorikaapelointitaulukko on luotu käyttämällä edellä esitettyä laskuesimerkkiä kullekin moottoriteholle. Laskuesimerkin jälkeen on valittu sopivat komponentit laskujen ja tehojen perusteella.

## LÄHTEET

- /1/ Turvallisuus- ja kemikaalivirasto, Tukes. Tuoteluettelo. ATEX-starttipaketti. Pdf-dokumentti. Viitattu 26.02.2020  
<https://tukes.fi/documents/5470659/8293726/ATEX-starttipaketti-2017.pdf/b440ed57-218e-4eda-a5b9-42df468e0b5f/ATEX-starttipaketti-2017.pdf>
- /2/ 2017. SFS-käsikirja 600-1. Pienjännitesähköasennukset. Helsinki. SFS ry.
- /3/ Tiainen, E. 2010. Johdon mitoitus ja suojaus. Espoo. Sähköinfo Oy.
- /4/ ABB ACS880 Laiteopas. ABB Oy. Pdf-dokumentti. Viitattu 16.01.2020.  
<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000103704&LanguageCode=fi&DocumentPartId=1&Action=Launch>
- /5/ Koivisto, P. & Ylinen, T. 2018. EMC ja rakennusten sähkötekniikka. 3., uud. painos. Espoo. Sähköinfo Oy.
- /6/ Reka kaapeli Oy. EMC-voimakaapelit. Viitattu 18.02.2020.  
<https://www.reka.fi/voimakaapelit/emc-voimakaapelit/emcmk-hf-c-halogeniton-emc-suojattu-voimakaapeli>
- /7/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Tehoelektroniikka.
- /8/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Teollisuuden ja voimalaitoksen sähköjärjestelmät.
- /9/ Tekninen opas nro 5, ABB. Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä. Pdf-dokumentti. Viitattu 04.02.2020.  
<https://library.e.abb.com/public/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopasnro5.pdf>
- /10/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste, luentomonisteet. Moottorikäyttöjen säätö.
- /11/ 2017. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista, D1-2017. Espoo. Sähköinfo Oy.
- /12/ Esala, M. Transistoreiden merkinnät. PDF-dokumentti. Viitattu 04.02.2020.

<http://www.kolumbus.fi/mikko.esala/transistorit.pdf>

- /13/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Moottorikäyttöjen ohjaus ja suojaus.
- /14/ Jokinen, K. Vaasan ammattikorkeakoulu. Yliopettaja. Opintomoniste. Teollisuuden ja voimalaitosten sähköjärjestelmät.
- /15/ Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R., Seesvuori, V. & Wilén. T. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Espoo. Sähköinfo Oy.
- /16/ ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 4. Sähkön laatu. Pdf-dokumentti. Viitattu 06.02.2020.  
[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTT/04\\_0\\_S%84hk%94n%20laatu.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTT/04_0_S%84hk%94n%20laatu.pdf)
- /17/ Verkkonen, V. Vaasan ammattikorkeakoulu. Opintomoniste. Teoreettinen sähkötekniikka 3, Taajuusanalyysi.
- /18/ Vacon 100 Laiteopas. Danfoss. PDF-dokumentti. Viitattu 07.02.2020.  
<http://files.danfoss.com/download/Drives/Vacon-100-IP00-Drive-Modules-Installation-Manual-DPD01815C-FI.pdf>
- /19/ ABB ACS880 industrial drives. ABB Oy. PDF-dokumentti. Viitattu 07.02.2020.  
<http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000098111&LanguageCode=en&DocumentPartId=1&Action=Launch>
- /20/ ABB ACS880-01 taajuusmuuttaja. ABB Oy. PDF-dokumentti. Viitattu 10.02.2020.  
<https://new.abb.com/drives/fi/pienjannitetaajuusmuuttajat/teollisuustaa-juusmuuttajat/acs880-taajuusmuuttajat/acs880-01>
- /21/ ABB FCO-12 turvatoimintomoduuli. ABB Oy. Viitattu 10.02.2020.  
<https://new.abb.com/drives/fi/liitettavyys/turvatoimintomoduuli>
- /22/ Tekninen opas nro.1, ABB Suora momenttisäätö. PDF-dokumentti. Viitattu 11.02.2020.  
<https://library.e.abb.com/public/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/Tekninenopasnro1.pdf>
- /23/ Vacon 100 -valintaopas. Danfoss. PDF-dokumentti. Viitattu 11.02.2020.

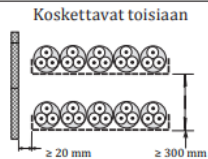
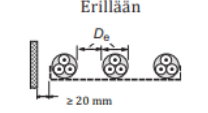
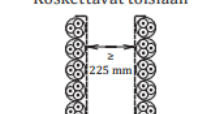
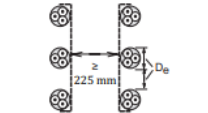
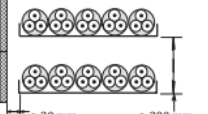
- [https://www.satmatic.fi/ckeditor/plugins/fileman/Uploads/Esitteet/muut%20esitteet/Selection%20guide%20DKDDPB906A320\\_VA-CON\\_100\\_LR.pdf](https://www.satmatic.fi/ckeditor/plugins/fileman/Uploads/Esitteet/muut%20esitteet/Selection%20guide%20DKDDPB906A320_VA-CON_100_LR.pdf)
- /24/ Vacon 100 HVAC. Danfoss. PDF-dokumentti. Viitattu 11.02.2020.  
<https://www.stmfinland.fi/p/vacon%C2%AE-100-hvac>
- /25/ Vacon 100 OPTBJ-lisäkortti. Danfoss. PDF-dokumentti. Viitattu 11.02.2020.  
<http://files.danfoss.com/download/Drives/Vacon-100-OPTBJ-STO-Board-User-Manual-DPD01057C1-FI.pdf>
- /26/ Vacon 100 Asennusopas. Danfoss. PDF-dokumentti. Viitattu 11.02.2020.  
<http://files.danfoss.com/download/Drives/Vacon-100-Wall-Mounted-Drives-Installation-Manual-DPD01714G-FI.pdf>
- /27/ Hakala, J. 2020. Technical Support Engineer. Email [jarkko.hakala@danfoss.com](mailto:jarkko.hakala@danfoss.com) 29.01.2020. Tulostettu 12.02.2020.
- /28/ Sähkömoottorit, ABB. Pienjännite prosessimoottorit. Viitattu 12.02.2020.  
<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK105944&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- /29/ Pienjännitekojeet, ABB. Kahvasulakkeet. PDF-dokumentti. Viitattu 13.02.2020.  
[https://library.e.abb.com/public/a7a3361674eef372c12572d500670426/OF2FI2004\\_01.pdf](https://library.e.abb.com/public/a7a3361674eef372c12572d500670426/OF2FI2004_01.pdf)
- /30/ 1 kV voimakaapelit, Prysmian Group. Viitattu 15.01.2020 ja 19.02.2020.  
<https://fi.prysmiangroup.com/tukut-urakoitsijat/1kV-voimakaapelit>
- /31/ Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. 1., painos. Vantaa. AMK-kustannus Oy.
- /32/ Moottorin ylijännite, Gambica/beama. Tekninen opas. PDF-dokumentti. Viitattu 24.02.2020.  
<http://www.gambica.org.uk/asset/5E97C960-870E-4C67-82BC1017EEC7089A/>
- /33/ ABB:n TTT-käsikirja 2000-07, 7. Oikosulkusuojaus. PDF-dokumentti. Viitattu 25.02.2020.  
[http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/07\\_1\\_Oikosulkusuojaus%20ja%20sulakkeet.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/07_1_Oikosulkusuojaus%20ja%20sulakkeet.pdf)

## LIITE 1

1(1)

Liite poistettu tilaajan pyynnöstä.

**Taulukko 17.** Monijohdinkaapeleiden korjauskertoimet asennustavoittain. /2/

Taulukon A.52.3 mukainen asennustapa			Hyllyjen tai tikkaiden lukumäärä	Hyllyllä tai tikkaalla olevien kaapelien lukumäärä					
				1	2	3	4	6	9
Rei'itetyt kaapelihyllyt (HUOM. 3)	31	Koskettavat toisiaan 	1	1,00	0,88	0,82	0,79	0,76	0,73
			2	1,00	0,87	0,80	0,77	0,73	0,68
			3	1,00	0,86	0,79	0,76	0,71	0,66
			6	1,00	0,84	0,77	0,73	0,68	0,64
		Erillään 	1	1,00	1,00	0,98	0,95	0,91	-
			2	1,00	0,99	0,96	0,92	0,87	-
3	1,00		0,98	0,95	0,91	0,85	-		
Pystysuorat rei'itetyt kaapelihyllyt (HUOM. 4)	31	Koskettavat toisiaan 	1	1,00	0,88	0,82	0,78	0,73	0,72
			2	1,00	0,88	0,81	0,76	0,71	0,70
		Erillään 	1	1,00	0,91	0,89	0,88	0,87	-
			2	1,00	0,91	0,88	0,87	0,85	-
Rei'ittämättömät kaapelihyllyt	31	Koskettavat toisiaan 	1	0,97	0,84	0,78	0,75	0,71	0,68
			2	0,97	0,83	0,76	0,72	0,68	0,63
			3	0,97	0,82	0,75	0,71	0,66	0,61
			6	0,97	0,81	0,73	0,69	0,63	0,58

**Taulukko 18.** Kaapelien korjauskertoimet kaapelin eristeineen mukaan. /2/

Taulukko B.52.14 Vapaasti ilmassa olevien kaapelien korjauskertoimet muille ympäristön lämpötiloille kuin 30 °C

Ympäristön lämpötilä <sup>a</sup> °C	Eristys			
	PVC	PEX ja EPR	Mineraali <sup>a</sup>	
			PVC:llä päällystetty tai paljas ja kosketeltavissa 70 °C	Paljas, ei kosketeltavissa 105 °C
10	1,22	1,15	1,26	1,14
15	1,17	1,12	1,20	1,11
20	1,12	1,08	1,14	1,07
25	1,06	1,04	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,94	0,96	0,93	0,96
40	0,87	0,91	0,85	0,92
45	0,79	0,87	0,78	0,88
50	0,71	0,82	0,67	0,84
55	0,61	0,76	0,57	0,80
60	0,50	0,71	0,45	0,75
65	-	0,65	-	0,70
70	-	0,58	-	0,65
75	-	0,50	-	0,60
80	-	0,41	-	0,54
85	-	-	-	0,47
90	-	-	-	0,40
95	-	-	-	0,32

<sup>a</sup> Korkeammilla ympäristön lämpötiloilla sovelletaan valmistajan antamia arvoja.

## LIITE 2

2(3)

**Taulukko 19. Prysmian Groupin MCCMK-kaapeleiden tekniset tiedot. /30/**

TUOTTEEN NIMI			MCCMK-HF C-PRo 3x1,5/1,5	MCCMK-HF C-PRo 3x2,5/2,5	MCCMK-HF C-PRo 3x6/6	MCCMK-HF C-PRo 3x10/10 RM	MCCMK-HF C-PRo 3x16/16 RM	MCCMK-HF C-PRo 4x1,5/1,5	MCCMK-HF C-PRo 4x2,5/2,5	MCCMK-HF C-PRo 4x6/6	MCCMK-HF C-PRo 4x10/10 RM	MCCMK-HF C-PRo 4x16/16 RM
Sähkönumero ja kela			K8/1000 0602090	K9/1000 0601997	K11/1000 0601999	K12/1000 0601995	K14/1000 0601996	K8/1000 0602004	K9/1000 0602008	K9/500 0602009	K11/500 0602005	K11/500 0602006
Sähkönumero ja pienkelapakkauk			PK150 0601994	PK100 0601998								
<b>SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)</b>												
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	12,1	7,41	3,08	1,83	1,15	12,1	7,41	3,08	1,83	1,15
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)	johdin 70°C	Ω/km	14,5	8,87	3,69	2,19	1,38	14,5	8,87	3,69	2,19	1,38
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	12,1	7,41	3,08	1,83	1,15	12,1	7,41	3,08	1,83	1,15
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,34	0,32	0,30	0,29	0,28	0,34	0,32	0,30	0,29	0,28
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28	0,25	0,25	0,26	0,27	0,28
<b>KUORMITETTAVUUS (2)</b>												
Maassa	johdin 70°C	A	26	35	57	77	100	26	35	57	77	100
Ilmassa	johdin 90°C	A	24	33	56	78	100	24	33	56	78	104

TUOTTEEN NIMI			MCCMK-HF Dca 3x25/16 RM EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x35/16 RM EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x50/25 AN EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x70/35 AN EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x95/50 AN EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x120/70 AN EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x150/70 AN EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x185/95 AN EMC-Line	MCCMK-HF Dca 3x240/120 AN EMC-Line
Sähkönumero			0602041	0602042	0602043	0602044	0602045	0602037	0602038	0602039	0602040
SUORITUSTASOILMOITUS (DoP)			1000194	1000195	1000207	1000208	1000209	1000210	1000211	1000212	1000213
<b>SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)</b>											
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,727	0,524	0,387	0,268	0,193	0,153	0,124	0,0991	0,0754
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)	johdin 70°C	Ω/km	0,87	0,63	0,47	0,32	0,23	0,19	0,15	0,12	0,097
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,15	1,15	0,727	0,524	0,387	0,268	0,268	0,193	0,153
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,23
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,35	0,35	0,40	0,40	0,45	0,45	0,50	0,50	0,55
<b>KUORMITETTAVUUS (2)</b>											
Maassa	johdin 70°C	A	130	160	190	240	285	325	370	420	480
Ilmassa	johdin 90°C	A	135	165	200	250	310	360	410	470	560



## LIITE 2

3(3)

**Taulukko 20.** Prysmian Groupin AMCMK- ja AXCCMK-kaapeleiden tekniset tiedot. /30/

TUOTTEEN NIMI			AMCMK 3x16/10 1 kV	AMCMK 3x25/16 1 kV	AMCMK 3x35/16 AN 1 kV	AMCMK 3x50/16 AN 1 kV	AMCMK 3x95/29 AN 1 kV	AMCMK 3x150/41 AN 1 kV
Sähkönumero			0622157	0622158	0622159	0622160	0622162	0622164
<b>SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)</b>								
Vaihejohtimen maks. tasavirta-resistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,91	1,20	0,868	0,641	0,320	0,206
Vaihejohtimen vaihtovirta-resistanssi (1)	johdin 70°C	Ω/km	2,3	1,4	1,0	0,77	0,39	0,25
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	1,83	1,15	1,15	1,15	0,641	0,443
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,28	0,28	0,26	0,25	0,24	0,23
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,40	0,45	0,55	0,60	0,75	0,80
<b>KUORMITETTAVUUS (2)</b>								
Maassa, asennustapa D	johdin 65°C	A	78	100	125	150	220	280
Ilmassa, asennustapa E	johdin 70°C	A	65	83	102	124	194	260
<b>TERMINEN OIKOSULKUKESTOISUUS (2)</b>								
Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta	vaihejohdin (4) PE-johdin (5)	kA kA	1,2 1,7	1,9 2,6	2,6 2,6	3,8 2,6	7,2 4,6	11,4 6,7

TUOTTEEN NIMI			AXCCMK-HF C-PRo 3x70/21 AN	AXCCMK-HF C-PRo 3x120/41 AN	AXCCMK-HF C-PRo 3x185/57 AN	AXCCMK-HF C-PRo 3x240/72 AN	AXCCMK-HF C-PRo 3x300/88 AN
Sähkönumero			0601981	0601968	0601970	0601976	0601978
<b>SÄHKÖISIÄ ARVOJA (2)</b>							
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,443	0,253	0,164	0,125	0,100
Vaihejohtimen vaihtovirtaresistanssi (1)	johdin 70°C	Ω/km	0,53	0,31	0,20	0,15	0,13
PE-johtimen maks. tasavirtaresistanssi	johdin 20°C	Ω/km	0,868	0,443	0,320	0,253	0,206
Induktanssi vaihetta kohti (1)		mH/km	0,25	0,24	0,24	0,23	0,23
Käyttökapasitanssi (1)		µF/km	0,40	0,44	0,49	0,52	0,55
<b>KUORMITETTAVUUS (2)</b>							
Maassa, asennustapa D	johdin 65°C	A	185	255	330	375	430
Ilmassa, asennustapa E	johdin 70°C johdin 90°C	A A	156 194	220 274	291 361	343 425	396 490